

Металлорежущие станки и автоматы

Под редакцией заслуженного деятеля науки и техники РСФСР
д-ра техн. наук проф. А. С. ПРОНИКОВА

*Допущено министерством высшего
и среднего образования СССР
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Технология машиностроения, металлорежущие
станки и инструменты»*



МОСКВА
• МАШИНОСТРОЕНИЕ •
1981

ББК 34.63-5

М54

УДК [621.9.06 + 621.9.06.234.3] (075)

Авторы: А. С. ПРОНИКОВ, Н. И. КАМЫШНЫЙ,
Л. И. ВОЛЧКЕВИЧ, М. М. КУЗНЕЦОВ, Б. Н. КУЗНЕЦОВ,
В. С. СТАРОДУБОВ, Б. А. УСОВ, П. М. ЧЕРНЯНСКИЙ

Рецензенты: кафедра «Металлорежущие станки» Одесского
ордена Трудового Красного Знамени политехнического
института, инж. О. И. ГУРОВ

Металлорежущие станки и автоматы: Учебник для
М54 машиностроительных вузов / Под ред. А. С. Прони-
кова. — М.: Машиностроение, 1981. — 479 с., ил.
В пер.: 2 р.

М $\frac{31304-124}{038(01)-81}$ 124-81. 2703000000

ББК 34.63.-5
6П4.6.08

© Издательство «Машиностроение», 1981 г.

В нашей стране развитию и совершенствованию парка металлорежущих станков и автоматов уделяется первоочередное внимание. Типаж металлорежущих станков, темпы развития станкостроения, уровень качества выпускаемых станков, удельный вес автоматизированного оборудования, в том числе с программным управлением, мобильность станочного парка для изготовления разнообразных изделий, высокая эффективность при эксплуатации станков — все это во многом определяет промышленный потенциал страны и характеризует уровень развития ее машиностроения.

Станки занимают особое место среди таких машин-орудий, как текстильные, транспортные, машины легкой промышленности, полиграфические и др., так как они предназначены для изготовления деталей других машин, т. е. для производства средств производства. Поэтому станкостроение часто называют сердцевиной машиностроения.

Современные металлорежущие станки — это высоко развитые машины, включающие большое число механизмов и использующие механические, электрические, электронные, гидравлические, пневматические и другие методы осуществления движений и управления циклом. По конструкции и назначению трудно найти более разнообразные машины, чем металлорежущие станки. На них обрабатывают всевозможные детали — от мельчайших элементов часов и приборов до деталей, размеры которых достигают многих метров, — турбин, прокатных станов, теплоходов. Поэтому и габариты самих станков весьма различны. Например, вращающийся стол одного из тяжелых карусельных станков производства Коломенского завода

тяжелого станкостроения превосходит по своим размерам арену цирка, а сложный токарный автомат для обработки мелких деталей свободно помещается на обычном столе.

На станках обрабатывают и простые цилиндрические, и поверхности, описываемые сложными математическими уравнениями или заданные графически, например, для криволинейных кулачков, турбинных лопаток, штампов, лопастей винтов. При этом достигается высокая точность обработки, измеряемая нередко долями микрометра. На станках обрабатывают детали из сталей и чугунов, из цветных, специальных жаропрочных, легких, твердых и других сплавов, из пластмасс, дерева, кварца, ферромагнитных сплавов и других материалов. Обрабатывают детали и из радиоактивных материалов, когда станком приходится управлять с удаленного от места обработки пульта, а за процессом наблюдать по телевизору.

Высокую производительность процесса обработки современные станки обеспечивают за счет быстроходности, мощности и широкой автоматизации. Существуют автоматические линии, участки и цеха, состоящие из десятков сложных станков и включающие контрольные и сборочные операции.

Все большее развитие получают станки с программным управлением, в том числе многоцелевые, обеспечивающие высокую мобильность производства, точность и производительность обработки. Автоматика все шире применяется не только для повышения производительности процесса обработки, но и для получения его высоких качественных показателей. Управление от ЭВМ группой станков, возможность оптимизировать процесс обработки и

автоматически устанавливать необходимые режимы обработки с учетом изменяющихся условий также характерно для автоматических систем современных станков. Конструкции станков и автоматов постоянно совершенствуются с учетом все возрастающих требований к их техническим характеристикам и, прежде всего, к точности и производительности. При создании новых станков используются достижения станкостроительной промышленности и науки, а также смежных областей техники. Например, на конструкцию станка влияет создание новых типов электродвигателей (высокомомментных, регулируемых), появление новых датчиков (преобразователей) положения, совершенствование электрогидравлической и оптической аппаратуры, создание новых методов управления от специализированных ЭВМ и т. п.

Советское станкостроение развивается быстрыми темпами. В решениях партии и правительства по развитию станкостроения особое внимание обращено на опережающее развитие выпуска станков с числовым программным управлением, развитие производства тяжелых и уникальных станков. В десятой пятилетке значительно увеличен выпуск специальных станков, автоматических линий и технологических комплексов, управляемых от ЭВМ. К конструкциям станков предъявляются высокие требования по качеству, производительности, надежности и безопасности в эксплуатации.

С учетом долгосрочных тенденций развития станкостроения определены следующие основные направления развития конструкций металлорежущих станков: повышение производительности станков путем интенсификации режимов обработки и сокращения вспомогательного времени; повышение точности обработки путем расширения номенклатуры прецизионных станков, а также создание новых конструкций, отвечающих требованию отраслей машиностроения, в том числе оснащенных средствами активного контроля; повышение уровня механизации и автоматизации металлорежущих станков за счет существенного расширения в типаже номенклатуры станков-автоматов и полуавтоматов и сокращения номенклатуры станков с ручным управ-

лением; расширение освоения номенклатуры и повышение технического уровня станков с цикловым и числовым программным управлением; создание конструкций станков с ЧПУ на базе широкой унификации и агрегатирования, в том числе многоцелевых станков с автоматической сменой инструмента; создание универсальных станков, оснащенных упрощенными устройствами ЧПУ, позволяющими осуществлять ручной ввод программ, их корректировку на станке и повторное воспроизведение; создание станков с ЧПУ с возможностью оснащения их промышленными манипуляторами, а также пригодных для встройки в автоматизированные участки, управляемые от ЭВМ; расширение технологических возможностей металлорежущих станков за счет комплектации их, необходимой номенклатурой принадлежностей и приспособлений; повышение надежности и долговечности станков за счет совершенствования их конструкций и технологии изготовления, а также широкого применения современных комплектующих изделий и материалов; создание новых специализированных станков, отвечающих требованиям массового и крупносерийного производства.

При проектировании новых моделей станков необходимо учитывать повышение технологических возможностей металлорежущего инструмента с применением минералокерамики, твердых сплавов с износостойкими покрытиями, абразивных инструментов из синтетического алмаза, эльбора и др. Решение обширных задач, стоящих перед станкостроением, требует развития науки о станках и подготовки высококвалифицированных специалистов в данной области.

Наука о станках формировалась под воздействием тех требований, которые выдвигала практика, когда необходимо было решить задачи по созданию прецизионных, экономичных, высокопроизводительных станков, автоматических линий и комплексов. Можно указать следующие основные направления, без которых было невозможно успешное развитие станкостроения: разработка методов кинематического расчета станков; создание методов оценки и расчета точности станков; исследования в области жесткости

станков и их элементов; развитие методов расчета механизмов и деталей станков; разработка теории производительности и автоматизации станков; исследования и разработка научных основ по динамике станков; исследования в области программного (в том числе адаптивного) управления станками; разработка методов расчета станков на надежность, долговечность и износостойкость.

Специалисты по проектированию и эксплуатации металлорежущих станков и автоматов должны обладать широким кругозором и глубокими знаниями по всем основным разделам науки о станках. Учитывая большое разнообразие станков, особое значение приобретает системный подход к изучению станков и автоматических линий как к единому технологическому комплексу, объединяющему привод, механизмы рабочего цикла, механизмы вспомогательных (холостых) ходов и системы управления. Эта многопараметрическая система с большим числом внутренних связей, подвергающаяся различным

внешним воздействиям, должна надежно функционировать и с наибольшей производительностью выполнять возложенные на нее технологические задачи.

Специальные курсы по металлорежущим станкам и автоматам рассматривают методы анализа и синтеза механизмов станка, его кинематику, методы управления и компоновку всей машины, а также структуру и взаимосвязи системы станков, объединенных в автоматическую линию или участок. Эти курсы базируются на основных положениях науки о станках, опираются на смежные курсы по теории резания, инструменту и технологии механообработки. Подготовка высококвалифицированных кадров станкостроителей, вооруженных современными знаниями по теории станкостроения и ее методологией, способных творчески решать постоянно возникающие задачи по созданию более совершенных станков, является необходимым условием для дальнейшего плодотворного развития отечественного станкостроения.

Глава 1 **Общие сведения**

§ 1. Классификация, обозначения и характеристики групп станков

Классификация. Станкостроительная промышленность СССР выпускает большое число металлорежущих станков, различных по назначению, конструкции, технологическим возможностям, универсальности, размерам и точности. Число разновидностей станков увеличивается, так как ежегодно появляются все новые и новые станки и модернизируются действующие. Для того чтобы было легче отличить один тип станка от другого, Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков (ЭНИМС) разработана классификация (табл. 1). Все серийно выпускаемые станки разделены на десять групп по виду выполняемой обработки или назначению. Кроме того, каждая группа разделена на десять типов по назначению, конструктивной особенности (компоновке, числу шпинделей и др.), универсальности, степени автоматизации, точности, виду применяемого инструмента.

По степени универсальности металлорежущие станки делят на следующие группы: универсальные — на них выполняют разнообразные операции на деталях широкой номенклатуры в индивидуальном и мелкосерийном производствах, а также используют при ремонтных работах; станки, предназначенные для выполнения большого числа разных работ, называют широко-универсальными; широкого назначения — станки, на которых выполняют ограниченное число различных операций с широкой номенклатурой деталей, их используют преимущественно в

мелкосерийном производстве; специализированные — предназначены для обработки однотипных деталей разных размеров в крупносерийном и массовом производствах; специальные — обрабатывают детали одного типоразмера, их используют только в массовом производстве.

По весу, зависящему от габаритных размеров, станки делят на легкие — 10 кН, средние — до 100 кН и тяжелые — свыше 100 кН. Тяжелые станки бывают крупными — от 100 до 300 кН, собственно тяжелыми — 300 кН — 1 МН и особо тяжелыми (уникальными) — более 1 МН.

По степени точности станки делят на классы: Н — нормальной точности, П — повышенной точности, В — высокой точности, А — особо высокой точности, С — особо точные (мастер-станки). Станки классов В, А и С эксплуатируются в специальных термоконстантных помещениях, в которых автоматически регулируются температура и влажность воздуха (см. раздел 2).

Обозначение. Принято цифровое и цифробуквенное обозначение модели станка. Оно состоит из трех-четырех цифр и одной-двух букв. Первая цифра обозначает номер группы, вторая — тип, последние — характеризуют один из важнейших технологических параметров станка (например, высоту центров для токарно-винторезных станков, диаметр сверления отверстия для сверлильных). Буква после первой или второй цифры указывает, что станок модернизирован, а буква, стоящая после цифр, — модификацию (видоизменение) базовой модели станка. Например, модель токарно-револьверного одношпиндельного автомата с макси-

Классификация металлорежущих станков

Группа стан- ков	Шифр груп- пы	Шифр типа									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Резервные*	0										
Автоматы и полуавтоматы											
Токарные	1	Специализи- рованные	Одношпин- дельные	Многошпин- дельные	Револьвер- ные	Сверильно- отрезные	Карусель- ные	Токарные и лобовые	Многорез- цовые	Специализи- рованные	Разные то- карные
Полуавтоматы											
Сверильные и расточные	2	—	Вертикаль- но-свер- лильные	Одношпин- дельные	Многошпин- дельные	Координат- но-расточ- ные	Радиально- свериль- ные	Горизон- тально-рас- точные	Алмазно- расточные	Горизон- тально- свериль- ные	Разные свериль- ные
Шлифоваль- ные и дово- лочные	3	—	Кругло- шлифоваль- ные	Внутришли- фовальные	Обдирочно- шлифоваль- ные	Специализи- рованные шлифоваль- ные	—	Заточные	Плоско- шлифоваль- ные	Притироч- ные и по- лировочные	Разные, ра- ботающие абразивами
Комбиниро- ванные	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Зубо- и резь- бообрабаты- вающие	5	Резьбона- резные	Зубостро- гальные для цилиндри- ческих ко- лес	Зуборезные для кони- ческих ко- лес	Зубофре- зерные	Для наре- зания чер- вячных пар	Для обра- ботки тор- цов зубьев	Резьбофре- зерные	Зубоотде- лочные и провероч- ные	Зубо- и резьбошли- фовальные	Разные зубо- и резь- бообрабаты- вающие
Фрезерные	6	—	Вертикаль- ные кон- сольные	Непрерыв- ного дей- ствия	—	Копиро- вальные и графиро- вальные	Вертикаль- ные бескон- сольные	Продоль- ные	Консоль- ные широко- конусные	Горизон- тальные консольные	Разные фре- зерные

Группа станков	Шифр группы	Шифр типа									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Резервные*	0										
Продольные											
Строгальные, долбежные и протяжные	7	—	Одностоечные	Двухстоечные	Поперечно-строгальные	Долбежные	Протяжные горизонтальные	—	Протяжные вертикальные	—	Разные строгальные
Разрезные											
Работающие											
Разрезные	8	—	резцом, пилами	абразивным кругом	гладким диском	Правильно-отрезные	Ленточные	Дисковые	Ножовочные	—	—
Разные	9	—	Опиловочные	Пилонасекательные	Правильно-бесцентрово-обдирочные	Балансировочные	Для испытания сверл и шлифовальных кругов	Длительные машины	—	—	—

* Группы резервной группы заполняют по мере необходимости.

мальным диаметром обрабатываемого прутка 24 мм — 1124, а 1Б124 — его модернизацию, в станке изменена конструкция привода и др. Базовую модель токарно-винторезного станка с высотой центров 200 мм обозначают 16К20, а его модификацию — токарный станок с высотой центров 200 мм с ЧПУ обозначают 16К20Ф3. Здесь Ф показывает наличие программного управления в станке.

Для обозначения специальных и специализированных станков заводом-изготовителем присвоен индекс из одной или двух букв, после которого ставится номер модели станка, например, специализированный станок для обработки реек Егорьевского станкостроительного завода «Комсомолец» обозначают ЕЗ-9.

Характеристика [35]. Рассмотрим характеристики станков нескольких групп.

Токарные станки. Детали на этих станках обрабатывают преимущественно точением (при вращении заготовки и поступательном движении резца). Однако на них применяют и другие виды обработки — сверление, развертывание, накатывание рифленых поверхностей, шлифование и т. п. При обработке детали несколькими инструментами один инструмент последовательно заменяют другим. Наибольшее распространение получили токарно-винторезные, револьверные, одно- и многошпиндельные автоматы. Универсальные токарно-винторезные станки нормальной точности предназначены для точения деталей, образованных нарезания резьбы; их используют в единичном и мелкосерий-

Таблица 2

Технические характеристики токарно-винторезных станков

Параметр	16K20	16K20П	16K20Г	16K25
Длина обрабатываемой детали L , мм, не более	1400 2000	710 1000 — 215	1400 2000	250
Высота центров над плоскими направляющими, мм				
Частота вращения шпинделя для станков, об/мин:				
основного исполнения	12,5—1600		12,5—1600	
по особому заказу	16—2000		10—1250	
Подача, мм/об:				
продольная		0,05—2,8		
поперечная		0,025—1,4		
Сила, допускаемая механизмом продольной подачи, Н, не более		7845 5884		
на упоре				
на резце				
Сила, допускаемая механизмом поперечной подачи, Н, не более		4510 3530		
на упоре				
на резце				
Мощность электродвигателя главного привода, кВт:		10		
основное исполнение				
по особому заказу		7,5		
Диаметр детали, устанавливаемой над станиной, мм, не более	400		500	
Диаметр детали, обрабатываемой над поперечными салазками суппорта, мм, не более	220		290	
Диаметр детали, устанавливаемой над выемкой в станине, мм, не более	—	—	630	—
Диаметр прутка, проходящего через отверстие в шпинделе, мм, не более		50		

Примечание. Габаритные размеры станка мод. 16K20 при $L=1400$ мм 3195×1196×1500 мм; масса станка 3225 кг.

ном производствах и для ремонтных работ. При наружном чистовом точении с их помощью можно получить точность обработки по 7—8-му квалитетам.

В табл. 2 приведены основные технические характеристики наиболее распространенных токарно-винторезных станков, выпускаемых заводом «Красный пролетарий» им. А. И. Ефремова: 16K20 — базовый станок нормальной точности; 16K20П — станок повышенной точности; 16K20Г — станок нормальной точности с выемкой в станине; 16K25 — облегченный станок нормальной точности с увеличенным диаметром обработки.

На рис. 1. показан универсальный токарно-винторезный станок мод. 16K20, элементы и компоновка которого являются типовыми для токарно-винторезных и многих других станков. Подвижными элементами станка являются суппорт и фартук, а переустанавливаемыми — задняя бабка и люнет. Жесткая коробчатой формы станина 15 с калеными шлифованными направляющими установлена на монолитном основании 16, одновременно служащим стружкосборником и резервуаром для охлаждающей жидкости. Шпиндель с фланцевым передним концом смонтирован в прецизионных подшипниках качения. Выходной вал шпиндельной бабки через сменные зубчатые колеса 4 соединен с коробкой подач 3, обеспечивающей перемещение суппорта 10. Перемещение суппорта 10 может быть осуществлено от ходового вала при точении или от ходового винта при нарезании резьб. Для нарезания резьб повышенной точности предусмотрено непосредственное соединение ходового винта с выходным валом коробки подач 3. Механические перемещения суппорта 10 осуществляют с помощью рукоятки фартука, направление поворота которой совпадает с направлением перемещения суппорта. Быстрые перемещения суппорта 10 включают дополнительным нажатием кнопки, встроенной в рукоятку. Фартук 12 оснащен механизмом отключения подачи, позволяющим обрабатывать детали по упорам при продольном и поперечном точении.

Промышленность выпускает токарно-винторезные станки с межцентровым расстоянием до 12 500 мм для обработки

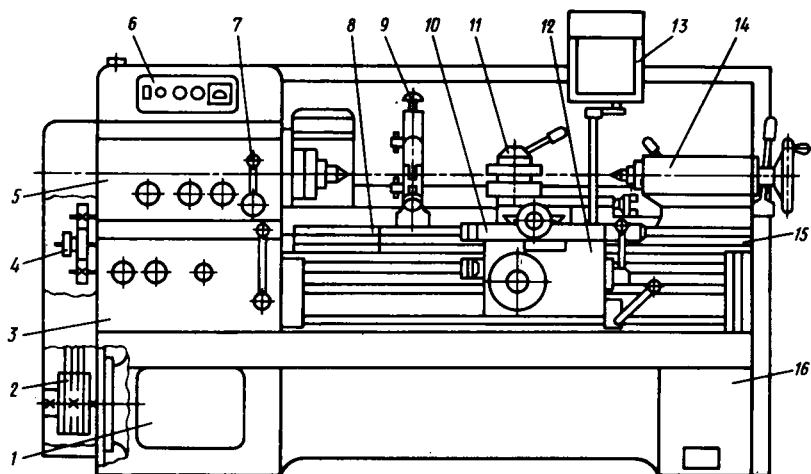


Рис. 1. Универсальный токарно-винторезный станок мод. 16K20:

1 — передняя тумба; 2 — ременная передача; 3 — коробка подач; 4 — коробка передач (сменные зубчатые колеса); 5 — шпиндельная бабка; 6 — кнопочная станция; 7 — орган управления; 8 — мостик; 9 — люнет; 10 — суппорт; 11 — резцедержатель; 12 — фартук; 13 — предохранительный щиток; 14 — задняя бабка; 15 — станина; 16 — основание

деталей диаметром 160—1250 мм, но эти предельные параметры корректируются при составлении типажа металлорежущих станков.

Специализированные станки. Лоботокарные станки применяют в индивидуальном производстве для обработки заготовок больших диаметров (до 3200 мм) и небольшой длины. Особенность их конструкции состоит в том, что основание, имеющее продольные направляющие, на которых расположен суппорт, можно переставлять по плите в поперечном направлении. Это расширяет диапазон диаметров обрабатываемых деталей.

Токарные многорезцовые станки предназначены для обработки деталей типа ступенчатых валиков. Особенность обработки ступенчатого валика на токарно-многорезцовом станке одновременно семью резцами заключаются в том, что верхний суппорт 3 осуществляет только поперечные подачи s_n , а нижний 4 — продольные $s_{пр}$ (рис. 2). Три резца, закрепленные в верхнем суппорте, производят выточку канавок и один резец — снятие фаски. Три резца, закрепленные на нижнем суппорте, обтачивают цилиндрические поверхности, причем левым и средним резцами обтачиваются различные участки одной поверхности (на рисунке суппорт показан в крайнем левом

положении). Вращение заготовке 2 передается от двухручачкового патрона 1.

Токарно-затыловочные станки применяются для обработки дисковых и червячных фрез. По своей структуре и компоновке они весьма схожи с токарно-винторезными станками (см. рис. 1) и отличаются конструкцией суппорта и числом кинематических цепей.

Токарно-револьверные станки предназначены для многоинструментальной обработки партий деталей сложной конфигурации — из прутка и штучных заготовок. Характерной особенностью токарно-револьверных станков (рис. 3) является наличие продольного суппорта 6 с револьверной головкой 5, в которую устанавливают державки с инструмен-

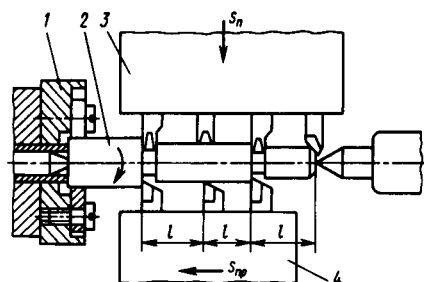
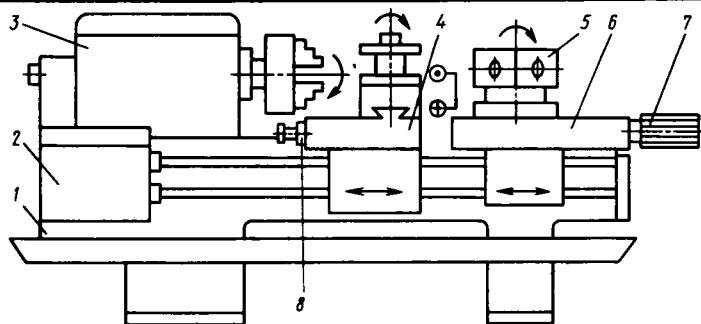


Рис. 2. Схема обработки ступенчатого валика на токарно-многорезцовом станке

Рис. 3. Токарно-револьверный станок



том. В резцедержатель поперечного суппорта 4 также устанавливают резец. В станке предусмотрена работа продольного и поперечного суппортов по упорам. Для этого продольный суппорт оснащен барабаном задних упоров 7, а поперечный — барабаном передних упоров 8.

Главное движение шпинделю передается от электродвигателя (на рис. 3 не показан) через коробку скоростей, вмонтированную в корпус передней бабки 3. Продольному и поперечному суппортам движение передается от шпинделя и коробки подач 2. Все механизмы монтируют на чугунной станине 1. Револьверные станки выполняют с многогранными и круглыми головками. Станки с круглой револьверной головкой поперечных суппортов не имеют. Поперечная подача инструментов в них осуществляется круговой подачей головки при медленном ее вращении.

Токарно-карусельные станки предназначены для обработки больших по весу и размерам деталей диаметром 800—25000 мм и высотой 800—500 мм. Карусельные станки имеют вертикальную компоновку, т. е. направляющие станины расположены вертикально, а стол с планшайбой — горизонтально. Такая компоновка облегчает загрузку заготовок и наблюдение за процессом обработки. При больших размерах карусельного станка, с диаметром обрабатываемой детали 25000 мм, стол устанавливают по высоте так, что его планшайба находится на уровне пола. Это также облегчает загрузку тяжелых деталей. Карусельные станки с диаметром обработки до 1500 мм делаются одностоечные, а свыше — двустоечные.

На рис. 4 показан двустоечный токарно-карусельный станок, который состоит из станины 1 с круговой направляющей, карусели 2 с планшайбой, стоек 3, соединенных поперечиной 7, траверсы 4, несущей вертикальный суппорт 6 с коробкой подач 5 и револьверный суппорт 8 (9 — револьверная головка) с коробкой подач 10 (коробки подач 5 и 10 с независимым приводом), бокового суппорта 11 с коробкой подач 12.

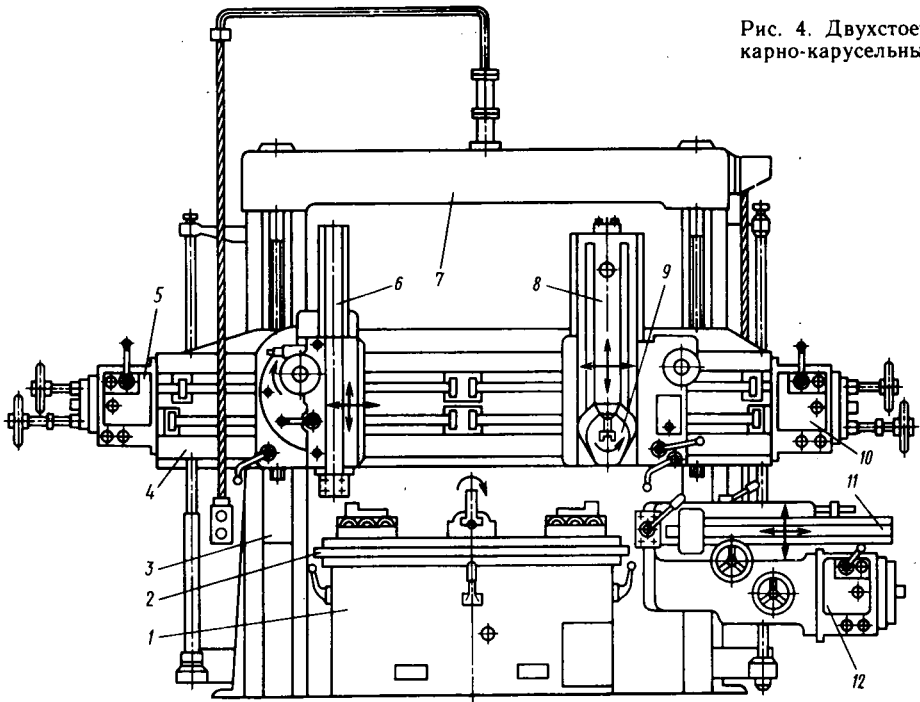
На карусельных станках производят многоинструментальную обработку: боковым суппортом обтачивают наружные поверхности, вертикальным — наружные и внутренние, револьверным — внутренние поверхности, сверлят, зенкуют, нарезают резьбу метчиком. С помощью специальных приспособлений можно фрезеровать и шлифовать.

Кроме универсальных токарно-карусельных станков станкостроительная промышленность СССР выпускает специализированные карусельные станки.

Токарные автоматы и полуавтоматы используют в массовом и крупносерийном производствах для обработки заготовок сложной формы — из прутка и штучных заготовок. Зажим прутка осуществляют цанговыми патронами, а штучных заготовок (большие по размерам, литье, поковки) — универсальными кулачковыми патронами. Детали на этих станках обрабатывают многими инструментами, которые устанавливают на суппорте револьверной головки и в специальных приспособлениях (сверлильных, резьбонарезных и др.).

Высокая производительность этих станков достигается полной автоматизацией рабочих и холостых ходов и их частичным совмещением, и многоста-

Рис. 4. Двухстоечный токарно-карусельный станок



ночным обслуживанием (более подробно см. раздел 7).

Сверлильные и расточные станки. Сверлильные станки относятся ко второй группе. Они предназначены для обработки сквозных, ступенчатых и глухих отверстий сверлами, зенкерами, метчиками и т. п. При оснащении сверлильных станков специальными инструментами и приспособлениями на них можно производить растачивание, хонингование и притирку отверстий. Сверлильные станки используют в механических, инструментальных, ремонтных цехах.

Универсальные сверлильные станки делят на несколько групп: 1) настольно-сверлильные одношпиндельные; 2) вертикально-сверлильные одношпиндельные; 3) радиально-сверлильные; 4) многошпиндельные сверлильные; 5) для глубокого сверления. В машиностроении большое распространение получили вертикально- и радиально-сверлильные станки.

Вертикально-сверлильный станок мод. 2А135 показан на рис. 5. Главным движением в станках этого типа является вращение шпинделя с инструментом, а движение подачи — поступательное осевое перемещение шпин-

деля. Заготовку устанавливают на столе, при обработке она неподвижна. Соосность обрабатываемого отверстия и шпинделя достигают перемещением заготовки относительно шпинделя в горизонтальной плоскости. Наибольший диаметр обрабатываемого на станке отверстия равен 35 мм. Частота вращения шпинделя на станке составляет 68—1100 об/мин, мощность 4,5 кВт, масса станка 1,52 т.

Радиально-сверлильный станок мод. 2М57 (рис. 6) предназначен для обработки отверстий в крупных деталях. На станке можно производить следующие операции: сверление в сплошном материале, рассверливание, зенкерование, развертывание, нарезание резьбы метчиками, растачивание отверстий, подрезание торцов, вытачивание кольцевых канавок в отверстиях и др. Основанием станка является фундаментная плита 1, на которой укреплена внутренняя неподвижная колонна 2. На внутренней колонне 2 установлена поворотная часть станка, состоящая из наружной гильзы 4 и рукава 7 с перемещающейся по его направляющим сверлильной головкой 6. Рукав перемещают по наружной гильзе с помощью механизма подъема или опускания по

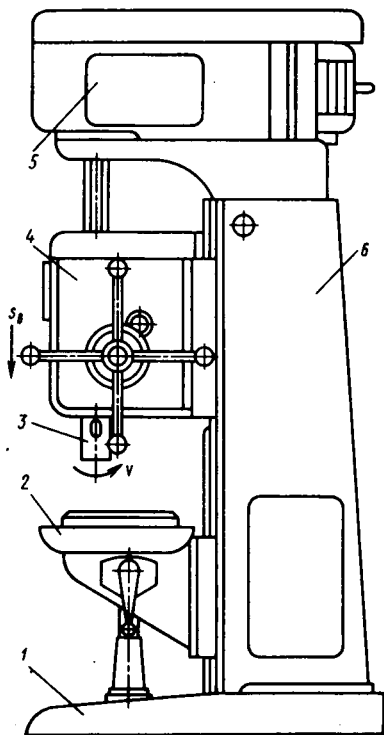


Рис. 5. Вертикально-сверлильный станок мод. 2A135.

1 — фундаментная плита; 2 — стол; 3 — шпиндель; 4 — коробка подач; 5 — коробка скоростей; 6 — станина (стойка с направляющими)

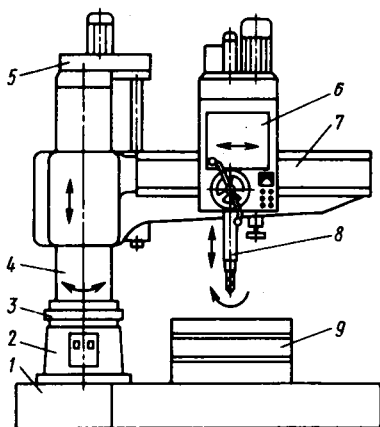


Рис. 6. Радиально-сверлильный станок мод. 2M57

колонне. Зажим гильзы при ее движении по колонне осуществляют гидравлическим механизмом 3. Установленная на рукаве сверлильная головка является самостоятельным силовым агрегатом, ее можно перемещать вдоль рукава вручную или механически. Сверлильная головка состоит из коробок скоростей и подач, механизма подачи, сверлильного шпинделя 8 и др. На фундаментной плите устанавливают стол 9 для крепления заготовок (крупные заготовки устанавливают непосредственно на фундаментную плиту).

Наиболее эффективно станок может быть использован в механических цехах мелко- и среднесерийного производства, а также в сборочных цехах заводов тяжелого и транспортного машиностроения.

Особенностью станка является наличие в нем более совершенного преселективного гидравлического управления скоростями и подачами. Сосредоточение всех органов управления станком на сверлильной головке, наличие гидрозажима колонны, заблокированного с зажимом сверлильной головки, автоматизация зажима рукава на наружной гильзе и механизация перемещения сверлильной головки по рукаву обеспечивают максимальное сокращение вспомогательного времени при работе на станке. Наибольший диаметр сверления обрабатываемого отверстия в стальной заготовке составляет 75 мм; частота вращения шпинделя станка 12,5—1600 об/мин, мощность электродвигателей (кВт): сверлильной головки — 7,5, вертикального перемещения рукава — 3,0.

Расточные станки. Эти станки могут иметь горизонтально или вертикально расположенный шпиндель. В шпинделе закрепляют борштангу с резцами или непосредственно инструмент (сверло, зенкер, развертку и др.). В зависимости от компоновки, точности установочных и рабочих перемещений расточные станки делят на горизонтально-, координатно- и алмазно-расточные [1,35].

Основным размером горизонтально-расточных станков является диаметр расточного выдвижного шпинделя, в зависимости от которого горизонтально-расточные станки могут быть малыми,

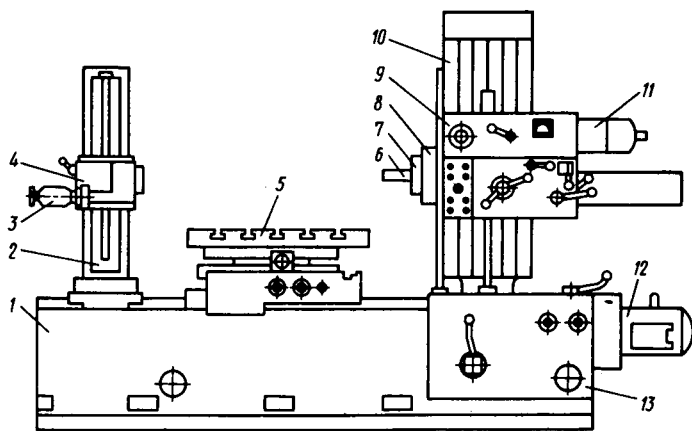


Рис. 7. Универсальный горизонтально-расточный станок мод. 2Л614

средними и тяжелыми. К малым горизонтально-расточным станкам относятся те, у которых диаметр растачиваемого отверстия равен 50—100 мм; у средних — 100—200 мм; у тяжелых — 125—320 мм.

Универсальный горизонтально-расточный станок мод. 2Л614 (рис. 7) предназначен для обработки отверстий в корпусных деталях. Станок снабжен встроенной в коробку скоростей 9 планшайбой 8 с радиальным суппортом 7. Коробка скоростей установлена на направляющих передней стойки 10. На станке можно производить сверление, растачивание, зенкерование и развертывание отверстий, фрезерование плоскостей и пазов выдвижным расточным шпинделем 6, а также обтачивание торцов и растачивание отверстий и кольцевых канавок радиальным суппортом. Шпиндель и планшайбу приводят во вращение с помощью электродвигателя 11 переменного тока, коробки скоростей 9, снабженной однорукоятным селективным механизмом.

Движение подачи осуществляется от электродвигателя постоянного тока 12 с широким диапазоном регулирования. Конструкция привода 13 позволяет изменять величину подачи без остановки станка.

Заготовку устанавливают на столе 5, имеющем продольные и поперечные подачи. Задняя стойка 2 с опорой 4 и электродвигателем 3 предназначена для поддержания оправок большой длины. Все элементы станка установлены на станине 1. Диаметр планшайбы станка

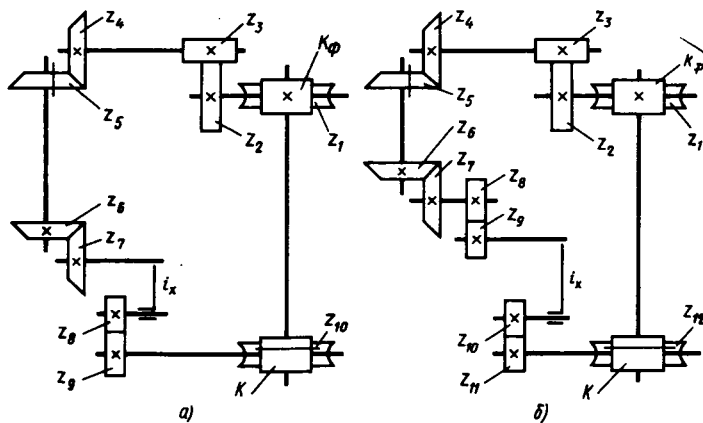
500 мм, наибольшее радиальное перемещение суппорта планшайбы 120 мм; наибольшее продольное перемещение выдвижного шпинделя 500 мм; рабочая поверхность стола 1000×800 мм; наибольшее продольное перемещение стола 1000 мм, поперечное — 800 мм; высота оси шпинделя над поверхностью стола 0—800 мм; частота вращения шпинделя 20—1600 об/мин; частота вращения планшайбы 8—200 об/мин; суммарная мощность электродвигателей 9 кВт.

Горизонтально-расточные станки сочетают в себе возможности универсальных, координатно- и алмазно-расточных станков. Оснащение их оптической измерительной системой, программным управлением, гидравлической подачей с бесступенчатым регулированием, разгруженными направляющими позволяет во многих случаях использовать горизонтально-расточные станки вместо дорогостоящих координатно- и алмазно-расточных.

§ 2. Основные понятия о кинематике станков

Основоположником кинематики станков является проф. Г. М. Головин, который разработал теоретические основы анализа, настройки и расчета кинематических цепей станков, им был создан курс кинематики станков. Курс кинематики станков изучает методы кинематического расчета, наладки и формообразования деталей резанием.

Рис. 8. Кинематические цепи обкатки зубофрезерного станка



Кинематическая цепь — это совокупность ряда передач: зубчатых, винтовых, реечных, ременных, храповых и др., осуществляющих передачу движений от начального звена к конечному, например от электродвигателя к шпинделю.

Условные обозначения передаточных пар и механизмов металлорежущих станков, предусмотрены ГОСТ 2.770—68, приведены в табл. 3.

Структура кинематической цепи — это последовательность расположения кинематических пар и звеньев в цепи. Две различные по структуре кинематические цепи обкатки зубофрезерного станка показаны на рис. 8. Если они будут предназначены для выполнения одной и той же операции, то независимо от различия в структуре их кинематические зависимости будут одинаковыми. Например, для кинематической цепи, показанной на рис. 8, а, кинематическую зависимость можно записать так:

$$1 \text{ об. ф. } \frac{z_2}{z_3} \frac{z_4}{z_5} \frac{z_6}{z_7} i_x \frac{z_8}{z_9} \frac{K}{z_{10}} = \frac{K_{\Phi}}{z_1},$$

а на рис. 8, б

$$1 \text{ об. ф. } \frac{z_2}{z_3} \frac{z_4}{z_5} \frac{z_6}{z_7} \frac{z_8}{z_9} i_x \frac{z_{10}}{z_{11}} \frac{K}{z_{12}} = \frac{K_{\Phi}}{z_1},$$

где 1 об. ф. — один оборот фрезы; i_x — передаточное отношение сменных зубчатых колес гитары настройки.

Структура кинематической цепи зависит от назначения станка (точение, сверление, шлифование и др.), требуемой точности передачи движения, пере-

даточного отношения цепи, конструктивных факторов (расположения главной оси станка, компоновки), динамики, технологических возможностей завода-изготовителя.

Уравнение кинематического баланса — это зависимость движения одного конечного звена кинематической цепи по отношению к другому, например, шпинделя (заготовки) и суппорта (реца). Для винторезной цепи (рис. 9) уравнение кинематического баланса (кратко — уравнение баланса) можно записать так:

$$1 \text{ об. шп. } i_x P = P_{\Pi},$$

где i_x — передаточное отношение гитары; P — шаг ходового винта; P_{Π} — шаг нарезаемой резьбы.

Сокращенная запись уравнения баланса: $1 \dots P_{\Pi}$.

Формула настройки — это преобразованное уравнение баланса, в котором определен параметр настройки, например, для винторезной цепи, показанной на рис. 9:

$$i_x = \frac{P_{\Pi}}{P},$$

где i_x — параметр настройки.

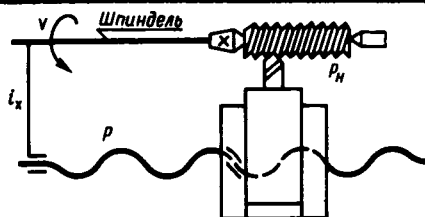
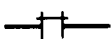
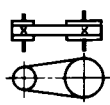
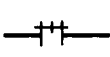
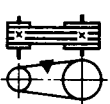
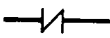
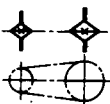
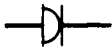
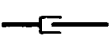
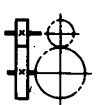
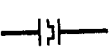
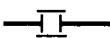
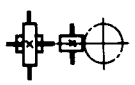
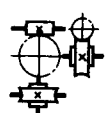
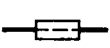
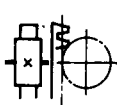
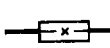
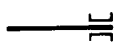
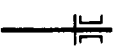
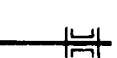
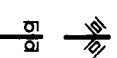


Рис. 9. Винторезная цепь токарного станка

Таблица 3

Условные обозначения элементов кинематических схем

Продолжение

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Вал		радиально-упорный двусторонний	
Соединение двух валов:		Ременная передача:	
глухое		плоским ремнем	
глухое с предохранением от перегрузок		клиновидным ремнем	
эластичное		Передача цепью	
шарнирное		Зубчатые передачи:	
телескопическое		цилиндрическими колесами	
плавающей муфтой		коническими колесами	
зубчатой муфтой		винтовыми колесами	
Соединение детали с валом:		червячная	
свободное при вращении		реечная	
подвижное без вращения		Передача ходовым винтом с гайкой:	
при помощи вытяжной шпонки		неразъемной	
глухое		разъемной	
Подшипники скольжения:			
радиальный			
радиально-упорный односторонний			
радиально-упорный двусторонний			
Подшипники качения:			
радиальный			
радиально-упорный односторонний			

Наименование	Обозначение
Муфты:	
кулачковая односторонняя	
кулачковая двусторонняя	
конусная односторонняя	
дисковая односторонняя	
дисковая двусторонняя	
электромагнитная односторонняя	
электромагнитная двусторонняя	
обгонная односторонняя	
обгонная двусторонняя	
Тормоза:	
конусный	
колодочный	
дисковый	

Условное изображение совокупности кинематических цепей станка в одной плоскости (плоскости чертежа) называется кинематической схемой. Назначение кинематической схемы станка —

дать полное представление о том, как передается движение к исполнительным механизмам. Передачи и механизмы в схемах показывают наглядным контуром, напоминающим форму действующих устройств.

На кинематической схеме приводят данные, по которым настраивают станок: для зубчатых колес указывают модуль, число зубьев, а для винтов — шаг резьбы.

Кинематическая схема токарно-винторезного станка мод. 16К20 показана на рис. 10. На выносках проставлены числа зубьев z колес. Составим уравнения баланса для следующих кинематических цепей:

1) главного движения (с перебором; реверсивная муфта M_1 включена влево)

$$1460 \frac{140}{268} \frac{51}{39} \frac{21}{55} \frac{15}{60} \frac{18}{72} \frac{30}{60} = n_{\text{шп}},$$

где $n_{\text{шп}}$ — частота вращения шпинделя, об/мин;

2) винторезной цепи при нарезании специальных резьб или повышенной точности (муфты M_2 и M_5 включены, коробка подач отключена)

$$1 \text{ об. шп.} \frac{60}{60} \frac{30}{45} \frac{K}{L} \frac{M}{N} P_x = P_n,$$

где K, L, M, N — числа зубьев сменных колес гитары; P_x — шаг ходового винта; P_n — шаг нарезаемой резьбы;

3) продольной подачи (муфты M_2 и M_5 выключены, а муфты M_3, M_4 и M_6 включены):

$$1 \text{ об. шп.} \frac{60}{60} \frac{30}{45} \frac{K}{L} \frac{L}{N} \frac{28}{28} \frac{28}{35} \frac{18}{45} \frac{15}{48} \times \\ \times \frac{23}{40} \frac{24}{39} \frac{28}{35} \frac{30}{32} \frac{32}{30} \frac{4}{21} \frac{36}{41} \frac{17}{66} \times \\ \times \pi m 10 = s_{\text{пр}},$$

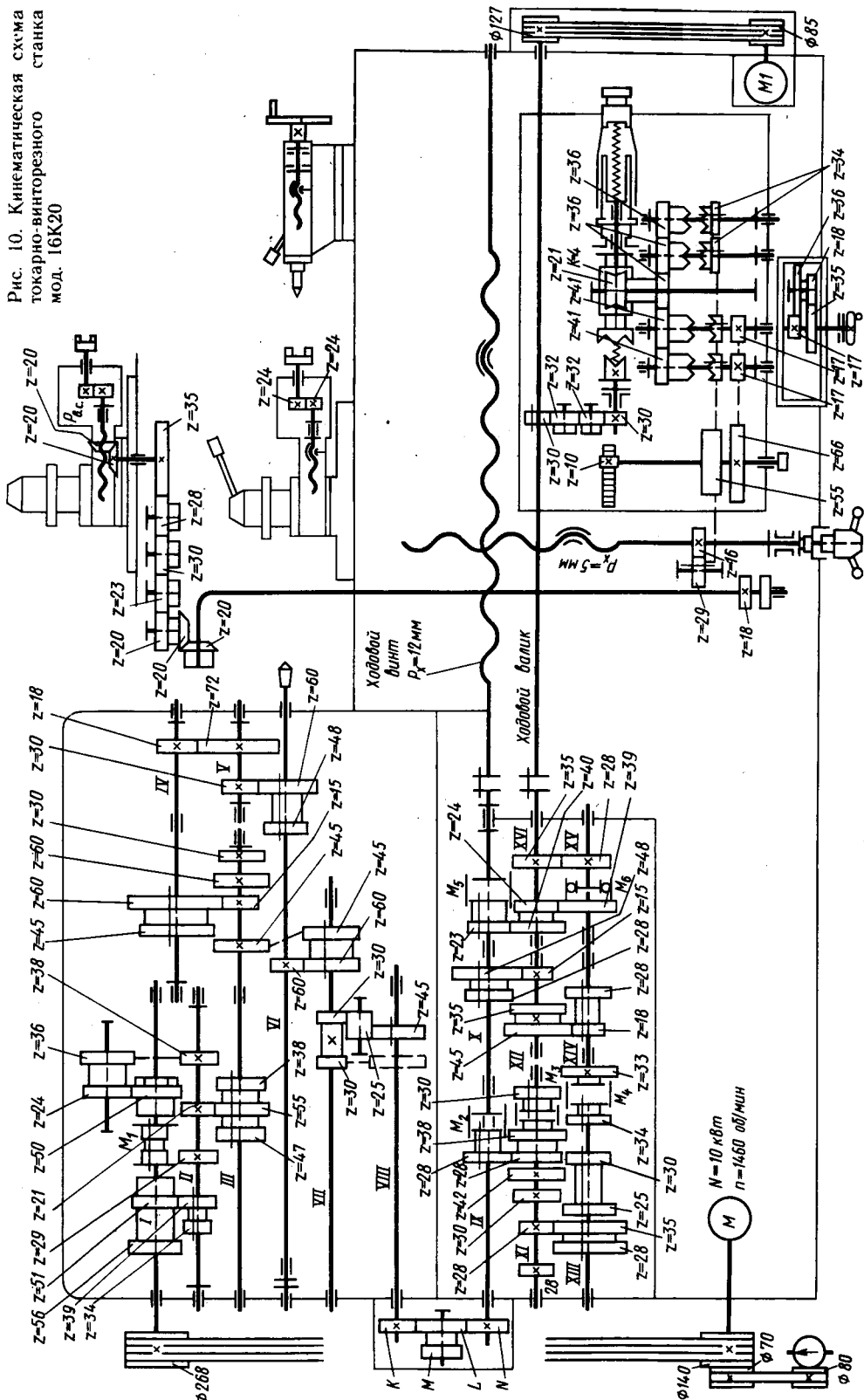
где K, L, M — числа зубьев сменных колес гитары

$\frac{K}{L} \frac{L}{N} = \frac{40}{86} \frac{86}{64}$; $s_{\text{пр}}$ — продольная подача, мм/об; m — модуль;

4) поперечной подачи (муфты M_2 и M_5 выключены, а муфты M_3, M_4 и M_6 включены):

$$1 \text{ об. шп.} \frac{60}{60} \frac{30}{45} \frac{K}{L} \frac{L}{N} \frac{28}{28} \frac{28}{35} \frac{18}{45} \times$$

7-56 7-51 7-29 7-21 7-50 7-04 7-36 7-38 7-45 7-60 7-30 7-30 7-18



$$\times \frac{15}{48} \frac{23}{40} \frac{24}{39} \frac{28}{35} \frac{30}{32} \frac{32}{32} \frac{32}{30} \frac{4}{21} \frac{36}{36} \times$$

$$\times \frac{34}{55} \frac{55}{29} \frac{29}{16} 5 = s_{\text{поп}},$$

где $s_{\text{поп}}$ — поперечная подача, мм/об;

5) подачи верхнего суппорта (муфты M_2 и M_5 исключены, а муфты M_3 , M_4 и M_6 включены)

$$1 \text{ об. шп. } \frac{60}{60} \frac{30}{45} \frac{K}{L} \frac{L}{N} \frac{28}{28} \frac{28}{35} \frac{18}{45} \times$$

$$\times \frac{15}{48} \frac{23}{40} \frac{24}{39} \frac{28}{35} \frac{30}{32} \frac{32}{32} \frac{32}{30} \frac{4}{21} \frac{36}{36} \times$$

$$\times \frac{34}{55} \frac{55}{29} \frac{29}{18} \frac{20}{20} \frac{20}{23} \frac{23}{30} \frac{30}{28} \frac{28}{35} \frac{20}{20} \times$$

$$\times P_{\text{в.с}} = s_{\text{в.с}},$$

где $P_{\text{в.с}}$ — шаг ходового винта верхнего суппорта;

$s_{\text{в.с}}$ — подача верхнего суппорта, мм/об.

§ 3. Методы образования поверхностей и форм деталей

Поверхность любой сложной детали можно представить в виде совокупности нескольких более простых: плоских, линейчатых, круговых, цилиндрических и конических, сферических, торовых и винтовых поверхностей (рис. 11). Любую поверхность рассматривают как совокупность последовательных положений (следов) одной производящей линии, называемой образующей 1, дви-

жущейся по другой производящей линии, называемой направляющей 2 (2', 2'').

Для получения плоской поверхности (рис. 11,а) необходимо образующую 1 прямую линию перемещать по прямой направляющей 2, для образования цилиндрической поверхности (рис. 11,б) направляющей 2 должна быть окружность 2 и т. д.

Плоские, линейчатые и цилиндрические поверхности являются обратимыми, так как для их получения можно менять функции образующих и направляющих линий. Кроме обратимых поверхностей есть необратимые — винтовая, торовая, сферическая и коническая поверхности; последнюю (рис. 11,з) получают при перемещении одного конца прямой образующей 1 по направляющей линии 2 (окружности), второй конец образующей прямой 1 остается неподвижным.

При работе на металлорежущих станках образующая и направляющая линии получают согласованными между собой движениями заготовки и инструмента (движения резания являются формообразующими). Формообразующих движений может быть одно или несколько. Некоторые методы формообразования поверхностей приведены на рис. 12. Образование поверхностей методом копирования режущей кромки инструмента показано на рис. 12,а. Режущая кромка инструмента, в данном случае, является образующей линией 1 обрабатываемой поверхности

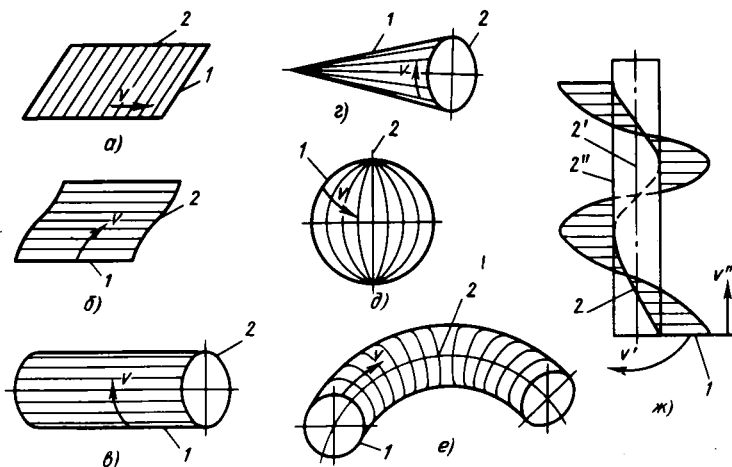


Рис. 11. Виды геометрических поверхностей, ограничивающие контуры деталей: а — плоская; б — линейчатая; в — цилиндрическая; г — коническая; д — сферическая; е — торовая; ж — helicoidalная

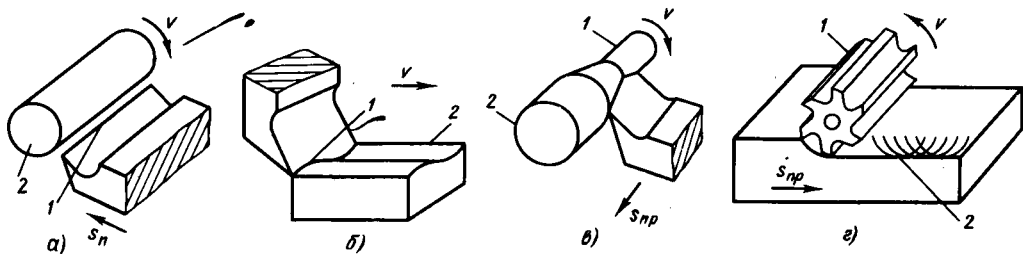


Рис. 12. Методы формообразования поверхностей:

1 — образующая; 2 — направляющая; v — скорость резания; s_n — поперечная подача; $s_{пр}$ — продольная подача

(рис. 12,б). Направляющая линия 2 воспроизводится при вращении заготовки (рис. 12,а) или поступательном движении инструмента (рис. 12,б), эти движения являются формообразующими.

Движение, направленное перпендикулярно обрабатываемой поверхности, необходимо для получения определенного размера детали.

Принцип образования поверхности методом следов состоит в том, что образующая линия 1 является траекторией движения вершины (точки) режущей кромки инструмента, а направляющая 2 — траекторией движения соответствующей точки заготовки (рис. 12,в). В этом случае оба движения резания (v , $s_{пр}$) являются формообразующими.

При образовании поверхностей методом касания направляющей линией 2 служит касательная к вспомогательным линиям, являющимся траекториями движения вершин режущей кромки инструмента. Образующей линией 1 служит режущая кромка инструмента (рис. 12,г), формообразующим движением является подача $s_{пр}$.

Движения, обеспечивающие цикл работы металлорежущих станков, делят по их целевому назначению: главное, подачи, деления, обкатки, дифференциальное, угла качения люльки (в зуборезных станках), вспомогательные (ускоренного подвода и отвода суппортов, столов, зажима, автоматического измерения) и др. Кинематические цепи классифицируют по движениям, которые они выполняют.

Например, кинематическая цепь, выполняющая движение подачи, называется кинематической цепью подачи, а цепь, выполняющая движение обкат-

ки, называется кинематической цепью обкатки и т. п.

Главное движение (движение резания) может осуществляться заготовкой и инструментом, например у токарных станков главным движением является движение шпинделя с заготовкой. Главное движение может быть вращательным и возвратно-поступательным. У некоторых станков оно может складываться из двух движений, например в автоматах при нарезании резьб методом обгона суммируются два вращательных движения. На главное движение затрачивается основная мощность привода. Скорость резания v , обеспечиваемую главным движением, определяют по формуле

$$v = \frac{\pi d_z n_z}{1000},$$

где d_z — диаметр заготовки, мм; n_z — частота вращения заготовки, об/мин.

Скорость резания шлифовальных станков задают в м/с, ее определяют по формуле

$$v_{ш} = \frac{\pi d_{ш} n_{ш}}{1000 \cdot 60},$$

где $d_{ш}$ — диаметр шлифовального круга, мм; $n_{ш}$ — частота вращения шлифовального круга, об/мин.

Скорость вращения заготовки при шлифовании

$$v_z = \frac{\pi d_z n_z}{1000 \cdot 60},$$

где d_z — диаметр заготовки, мм; n_z — частота вращения заготовки, об/мин.

Таким образом, $v = v_{ш} + v_z$.

В продольно-строгальных станках главное (возвратно-поступательное) движение совершает стол с заготовками. Скорость резания v (м/мин) определяют по формуле

$$v = \frac{2l n_{\text{дв. ход}}}{1000},$$

где l — длина хода стола, мм;
 $n_{\text{дв. ход}}$ — число двойных ходов резца, дв. ход/мин.

В поперечно-строгальных станках главным является движение инструмента, создаваемое кинематической цепью, включающей кулисный механизм, преобразующий вращательное движение в возвратно-поступательное. Скорость резания подсчитывают по той же формуле, что и для продольно-строгальных станков.

Движение подачи (поступательное) получает инструмент, это дает возможность вести процесс резания по всей длине заготовки. Подачу рассчитывают как отношение перемещения инструмента к одному обороту заготовки или одному обороту самого инструмента. В зависимости от направления движения инструмента по отношению обрабатываемой поверхности заготовки подачи делят на продольную, поперечную, круговую, радиальную, тангенциальную. Кроме того, подачи могут быть осевыми (в сверлильных станках), вертикальными и горизонтальными (во фрезерных станках), прерывными (в строгальных и зубодолбежных станках), непрерывными (в токарных станках).

Делительным движением называют такое, которое осуществляет поворот заготовки или инструмента на требуемый угол, например при нарезании зубьев колес на зубострогальных станках, или линейное перемещение заготовки относительно инструмента, так, например, при нанесении шкал на линейке на продольной делительной машине.

В некоторых случаях идут на усложнение конструкции инструмента для того, чтобы не вводить делительный механизм; например зубодолбежный станок мод. 512 оснащен сложным режущим инструментом — долбяком, и нарезание зубьев происходит при взаимной обкатке долбяка и заготовки.

При осуществлении движения обкатки отсутствует проскальзывание между инструментом и заготовкой. Это движе-

ние осуществляют на зубодолбежных, зубострогальных и других станках.

Дифференциальное движение применяют в станках для создания дополнительного движения заготовки или инструменту, например в затыловочных, зубофрезерных и других станках для обработки спиральных зубьев. Можно осуществлять суммирование только одноименных движений — вращательного с вращательным, поступательного с поступательным. Для суммирования движений применяются дифференциальные суммирующие механизмы.

Вспомогательные движения при работе на станке предназначены для осуществления отвода и подвода суппортов, траверс, столов, зажима инструмента и заготовок, удаления стружки и др. Вспомогательные движения можно осуществлять вручную или специальными механизмами. Обязательным условием автоматизации производственных процессов является автоматизация вспомогательных движений.

§ 4. Элементы базовой конструкции универсального токарно-винторезного станка мод. 16К20 и их общность по назначению с элементами других групп станков

Металлорежущие станки в большинстве случаев состоят из механизмов, сходных по кинематике: шпиндельных коробок, коробок подач, фартуков, суппортов, столов, гитар и т. п.

Для изучения конструкции и кинематики механизмов металлорежущих станков рассмотрим токарно-винторезный станок мод. 16К20 (см. рис. 1).

Приспособления для крепления заготовок разнообразны по конструкции, их сложность зависит от назначения станка, универсальности и характера производства. Для универсальных станков, используемых в единичном и серийном производстве, применяют стандартные зажимные приспособления. В специальных станках, используемых в массовом производстве, применяют специальные зажимные приспособления с максимальной автоматизацией их действий.

Механизмы главного движения. В качестве механизма главного движения применяют индивидуальный привод, который состоит из электродвигателя, ременной или зубчатой передачи, ко-

робки скоростей со шпинделем (шпиндельной бабки). Индивидуальный привод позволяет получать большую частоту вращения шпинделя и менять ее, расставляя станки соответственно технологическому процессу, более рационально использовать мощность электродвигателя, т. е. включать станки независимо друг от друга.

Электродвигатели индивидуальных приводов устанавливают на передней тумбе станка 1 (см. рис. 1) или на полу, возле нее. В некоторых станках электродвигатели устанавливают непосредственно на шпиндельной бабке, например у полуавтоматов мод. 116. Такое расположение электродвигателя вызывает колебания станка, их нужно избегать.

Встроенный привод — это такой привод, у которого детали электродвигателя являются органической частью станка, например корпус передней бабки является корпусом электродвигателя, а ротор смонтирован непосредственно на шпинделе. Приводы такого типа применяют в шлифовальных, токарных и других станках. В некоторых металлорежущих станках в корпусе передней бабки устанавливают зубчатые колеса, создающие различные частоты вращения шпинделя. Шпиндельные коробки при такой конструкции применяют во многих токарно-винторезных станках, например в станках мод. 16K20 (см. рис. 10), мод. 136 и др.

В токарно-винторезных станках применяют отдельные коробки скоростей. Например, у токарно-винторезного станка мод. 1А616 коробка скоростей выполнена в отдельном корпусе и смонтирована в передней тумбе (рис. 13), а перебор со шпинделем — в корпусе передней бабки. Движение от коробки скоростей на шпиндель передается клиноременной передачей. Такой привод уменьшает колебания шпинделя, так как колебания, возникающие в коробке скоростей, не передаются через гибкое звено — клиновые ремни на шпиндельную коробку. Кроме того, возможно применение унифицированной коробки скоростей для гаммы однотипных моделей станков.

Подвижную шпиндельную коробку применяют в расточных станках (см. рис. 7), где необходима перестановка шпинделя в горизонтальном направле-

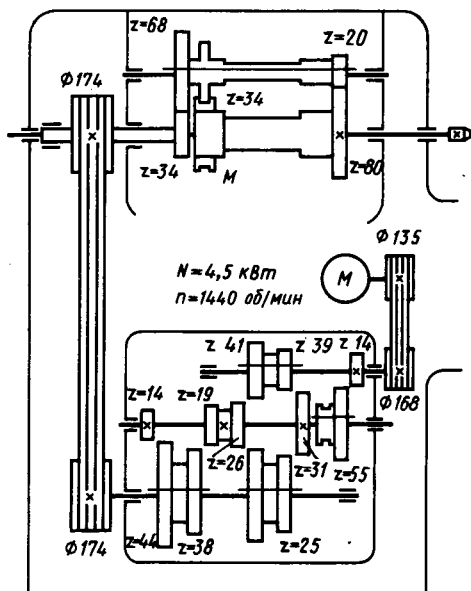


Рис. 13. Кинематическая схема привода главного движения токарно-винторезного станка мод. 1А616 с отдельной коробкой скоростей

нии для обработки отверстий в детали на различной высоте от установочной поверхности стола. В корпусе шпиндельной коробки монтируют не только цепь главного движения, но и подачи.

В прецизионных станках механизм главного движения выполняют таким образом, что движение на шпиндель передается от коробки скоростей через ременную передачу. Последняя уменьшает передачу колебаний на шпиндель, возникающих в коробке скоростей, вследствие чего повышается точность обработки.

В горизонтально-фрезерных (рис. 14) и других типах станков механизмы главного движения и движения подачи выполняются независимыми, т. е. движение на шпиндель и на стол передается от отдельных электродвигателей. Это значительно упрощает конструкцию станка — нет телескопического валика с универсальными шарнирами, возможно передавать большую мощность на механизм подачи стола. Механизм главного движения горизонтально-фрезерного станка мод. 6Н82 состоит из привода 6, шпиндельной коробки 5 (шпиндельная коробка имеет 18 ступе-

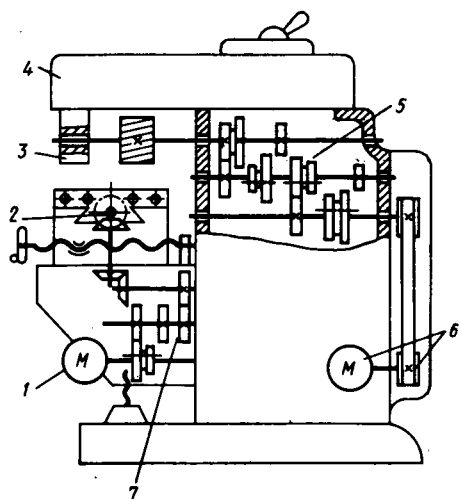


Рис. 14. Кинематическая схема горизонтально-фрезерного станка мод. 6Н82

ней частот вращения от 30 до 1500 об/мин.; механизм подачи состоит из электродвигателя 1, коробки подач 7 (с пределами подач от 28 до 1180 мм/мин, число подач 18), ходового винта 2 и гайки. Для повышения жесткости шпинделя станок снабжен хоботом 4, несущим опору 3.

У некоторых металлорежущих станков главное движение является возвратно-поступательным, например в строгальных, долбежных, зубострогальных и др. В качестве механизмов, преобразующих вращательное движение в возвратно-поступательное, применяют кулисы, кривошпы, шестеренчатые реверсы с реечной парой и др. Механизм главного движения одностоечного продольно-строгального станка состоит из

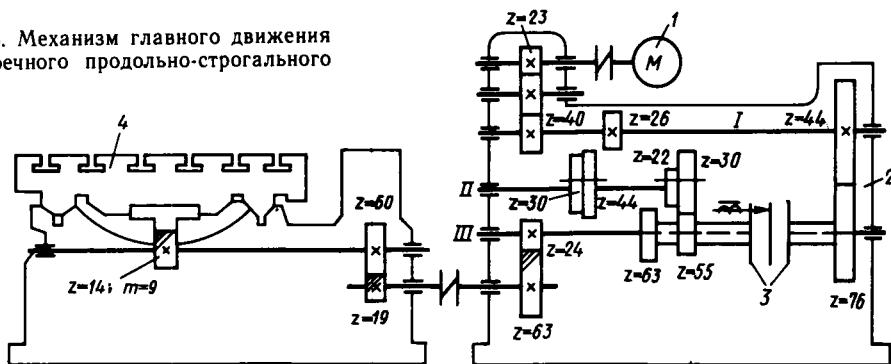
электродвигателя 1, коробки скоростей 2 (рис. 15). Вращательное движение от электродвигателя передается на валы I и II всегда в одном направлении, а на вал III — в прямом и обратном направлении, что достигается включением электромуфты 3 влево и зубчатых колес $z=55$ или 63 (рабочий ход) или вправо и зубчатого колеса $z=76$ (обратный быстрый ход). В соответствии с движениями вала III осуществляется и реверсивное движение зубчатых передач $\frac{24}{63} \cdot \frac{19}{60}$ и реечной шестерни $z=14$, последняя и осуществляет возвратно-поступательное движение стола 4.

Звено увеличения шага применяется в токарно-винторезных, затыловочных и других станках для нарезания резьб большого шага (большого, чем шаг ходового винта). В токарно-винторезном станке мод. 16К20 (см. рис. 10) звеном увеличения шага является зубчатое колесо $z=45$ двойного блока, посаженное на вал VII и колесо $z=45$, посаженное на вал III. Движение от шпинделя на эти колеса передается перебором. Увеличение шага нарезаемой резьбы, в данном случае, возможно в 2,8 и 32 раза. При этом частота вращения вала VII при работе без перебора

$$n_{VII} = 1 \text{ об. шп. } \frac{60}{60} = 1; n_{VII} = 1 \text{ об. шп. } \frac{60}{30} \frac{45}{45} = 2;$$

$$\text{с перебором } n_{VII} = 1 \text{ об. шп. } \frac{60}{30} \frac{72}{18} \times \times \frac{45}{45} \frac{45}{45} = 8,$$

Рис. 15. Механизм главного движения одностоечного продольно-строгального станка



$$n_{VII} = 1 \text{ об. шп. } \frac{60}{30} \frac{72}{18} \frac{60}{15} \frac{45}{45} = 32.$$

Движение от вала VII передается на вал VIII коробки передач (сменных зубчатых колес) и далее на ходовой винт IX.

Гитары. Гитарой называется механизм настройки кинематической цепи. Гитары делят на парносменные, двухпарные и многопарные. Парносменная гитара состоит из двух сменных колес (рис. 16,а). Расстояние между осями постоянное, поэтому сумма зубьев сменных колес, установленных на оси, будет всегда постоянной: $z_1 + z_2 = \text{const}$. Это снижает диапазон настройки кинематической цепи. Парносменные гитары применяют в цепях главного движения и подачи, преимущественно в специализированных станках.

Двухпарная гитара (рис. 16,б) состоит из корпуса 1, оси 2, фиксирующего болта 3 и сменных колес. В двухпарной гитаре установлены четыре сменных колеса. Поскольку сумма зубьев сцепляемых колес при различных настройках различна, в корпусе гитары предусмотрен паз, позволяющий перемещать ось 2 и таким образом осуществлять зацепление сменных колес z_3 и z_4 различных диаметров. Болтом 3 фиксируют корпус гитары в требуемом положении для сцепления z_1 с z_2 . Двухпарные гитары обеспечивают широкий диапазон настройки кинематической цепи, их применяют в универсальных металлорежущих станках. При выполнении настроек на двухпарной гитаре необходимо соблюдать условие сцепляемости сменных колес: $z_1 + z_2 > z_3$, $z_3 + z_4 > z_2$. Сумма зубьев двух сцепляемых колес должна быть больше последующего колеса на 15—20 зубьев, иначе зубчатое колесо будет перерезать

вал (рис. 16,в). Многопарная гитара состоит из более чем четырех сменных колес. В корпусе такой гитары делают два и более пазов. На рис. 16,г показана трехпарная гитара. Условия сцепляемости для нее можно записать так: $z_1 + z_2 > z_3$, $z_3 + z_4 > z_2$, $z_5 + z_6 > z_4$. Многопарные гитары обеспечивают более широкий диапазон настройки кинематических цепей.

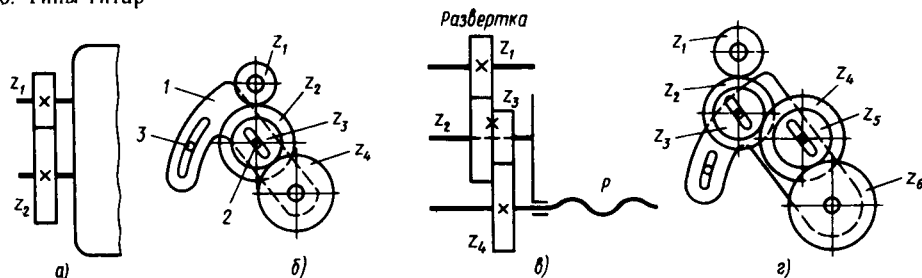
Комплекты сменных колес. В металлорежущих станках применяют комплекты сменных колес. Для различных групп станков они различны. Однако все комплекты сменных колес создаются на основе общего ряда чисел зубьев сменных колес: 20 — 23 — 25 — 30 — 33 — 34 — 35 — 37 — 40 — 41 — 43 — 45 — 47 — 50 — 53 — 55 — 58 — 59 — 60 — 61 — 62 — 65 — 67 — 70 — 71 — 73 — 75 — 79 — 80 — 83 — 85 — 89 — 90 — 92 — 95 — 97 — 98 — 100 — 105 — 110 — 113 — 115 — 120 — 127 — всего 44 колеса.

Для токарно-винторезных станков принят набор колес, у которых числа зубьев кратны пяти (в комплекте 22 колеса).

Набор зубчатых колес для зуборезных станков ограничен колесом с числом зубьев 100. В затыловочных станках набор колес аналогичен общему, но в нем нет колеса с $z=113$. Для фрезерных станков (для настроек делительных головок) набор состоит из колес с числами зубьев: 25 — 25 — 30 — 35 — 40 — 50 — 55 — 60 — 70 — 80 — 90 — 100 (всего 12 колес).

Коробки подачи. Коробка подачи предназначена для изменения перемещения конечного звена кинематической цепи: суппорт, стол, шпиндель и др. В универсальных станках число различных подач может быть большим, например, в токарно-винторезном станке мод.

Рис. 16. Типы гитар



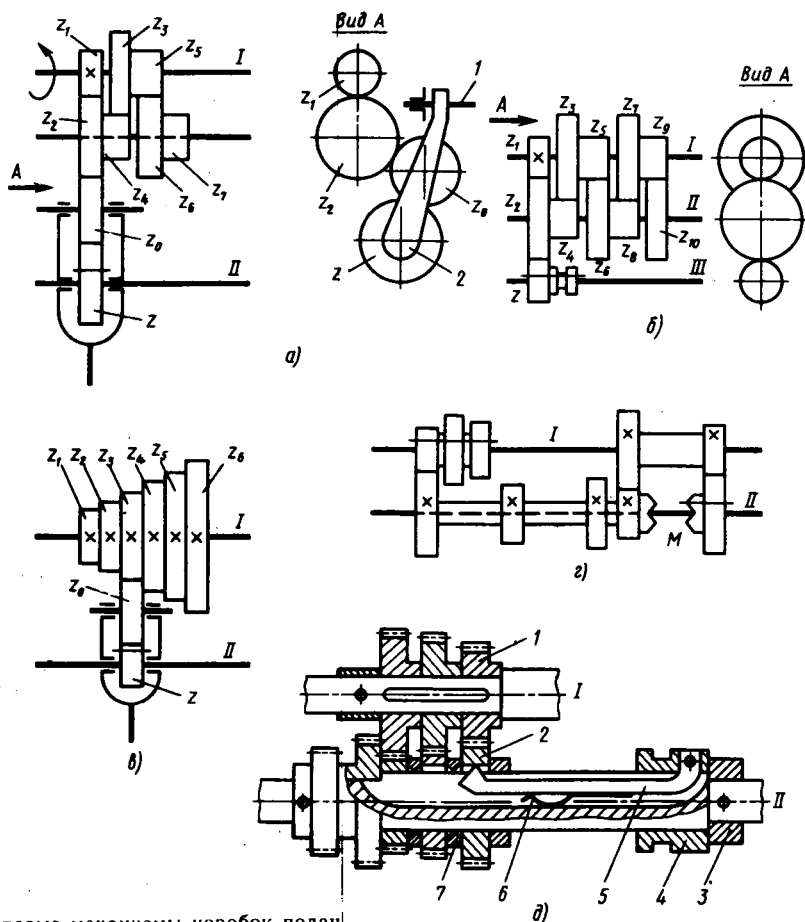


Рис. 17. Типовые механизмы коробок подач

16K20 выполнено 48 простых подач и 149 для нарезания шагов резьб.

В специализированных станках число подач может быть меньше, например, в затыловочном станке мод. 1811 (рис. 17,г) всего шесть простых подач. Настройку на шаг резьбы в этом станке производят подбором зубчатых колес гитары, за счет чего достигается многовариантность настройки.

В конструкцию коробок подач обычно включают типовые механизмы: миандр с накидным или подвижным зубчатым колесом, конус Нортон, коробки с зубчатыми колесами, муфтами, конусы, набранные из зубчатых колес с вытяжной шпонкой.

Механизм миандра с накидным колесом z_0 (рис. 17,а) позволяет увеличивать в 2 раза передаточные отношения i при включении соседней пары зубчатых колес. Если принять вал I ведущим, вал II ведомым, $z = z_2 = z_3 = z_6 = 56$, а

$z_1 = z_4 = z_5 = z_7 = 28$, то получим передаточные отношения механизма:

$$i_1 = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_3}{z_0} \cdot \frac{z_0}{z} = \frac{1}{2}, \quad i_2 = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_4}{z_0} \times \\ \times \frac{z_0}{z} = \frac{1}{4}, \quad i_3 = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_5}{z_6} \cdot \frac{z_7}{z_0} \cdot \frac{z_0}{z} = \\ = \frac{1}{8}, \quad i_4 = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_5}{z_6} \cdot \frac{z_7}{z_0} \cdot \frac{z_0}{z} = \frac{1}{16}.$$

Механизм миандра еще называют «умножающим механизмом». Механизм с накидным колесом имеет тот недостаток, что он не обеспечивает постоянного межосевого расстояния между накидным колесом z_0 и z_2 , так как поворотный рычаг 2 фиксируют не жестким подвижным цилиндрическим фиксатором I.

На рис. 17,б показана более совершенная конструкция механизма миандра, из которого исключено накидное колесо с поворотным рычагом. Соединение с колесами блоков производят

подвижным колесом z , благодаря чему обеспечивается постоянство межосевых расстояний.

Механизм Нортон (рис. 17, в) представляет собою конус, набранный из зубчатых колес, с накидным колесом, смонтированным на поворотном рычаге с цилиндрическим фиксатором. Накидное колесо z_0 может поочередно вступать в зацепление со всеми колесами ($z_1—z_6$) и передавать движение от вала I на вал II . Таким образом, можно получить шесть различных передаточных отношений. Преимуществом этого механизма является компактность, недостатком — малая жесткость.

Коробка подач универсального токарно-винторезного станка мод. 16K20 (см. рис. 10) включает цилиндрические зубчатые колеса, передвигные блоки зубчатых колес и муфты. Постоянные межосевые расстояния между валами позволяют передавать большие мощности. Движение от шпинделя VI на вал коробки подач IX передается через валы VII и $VIII$ и сменные зубчатые колеса гитары K, L, M, N . Коробка подач обеспечивает обработку различных резьб, а также обточку гладких цилиндрических, конических и других поверхностей.

При нарезании метрических и дюймовых резьб, а также при обработке цилиндрических поверхностей устанавливают сменные зубчатые колеса гитары $\frac{K}{L} \frac{L}{N} = \frac{40}{86} \frac{86}{64}$, а при нарезании модульных и питчевых резьб $\frac{K}{L} \frac{M}{N} =$

$$= \frac{60}{73} \frac{86}{36}.$$

Коробка подач имеет две основные кинематические цепи. Одна цепь служит для нарезания дюймовых и питчевых резьб. При этом движение на ходовой винт передается, когда муфты M_2, M_3, M_4 и M_6 выключены, а муфта M_5 включена:

$$\frac{28}{28} \frac{38}{34} \frac{25}{30} \left(\text{или } \frac{30}{42}; \frac{35}{28}; \frac{28}{28} \right) \frac{30}{33} \times \\ \times \frac{18}{45} \left(\text{или } \frac{28}{35} \right) \frac{15}{48} \left(\text{или } \frac{35}{28} \right).$$

Другая цепь предназначена для нарезания метрических и модульных резьб. При этом муфты M_2 и M_6 выключены, а муфты M_3, M_4 и M_5 включены:

$$\frac{28}{28} \frac{30}{25} \left(\text{или } \frac{42}{30}; \frac{28}{35}; \frac{28}{28} \right) \frac{18}{45} \times \\ \times \left(\text{или } \frac{28}{35} \right) \frac{15}{48} \left(\text{или } \frac{35}{28} \right).$$

При обработке цилиндрических поверхностей движение на ходовой валик может передаваться как по первой, так и по второй кинематической цепи (муфта M_5 выключена, M_6 включена).

При нарезании специальных резьб и резьб повышенной точности движение передается прямо на ходовой винт, т. е. коробка подач отключена, а муфты M_2 и M_5 включены. В данном случае настройку винторезной цепи на требуемый шаг нарезки производят подбором сменных зубчатых колес гитары.

Механизм с двумя обратными конусами, набранными из зубчатых колес, и вытяжной шпонкой показан на рис. 17, д. На валу I на шпонке посажены зубчатые колеса 1 , а на валу II — свободносидящие зубчатые колеса 2 , разъединенные кольцами 7 . Вытяжная шпонка 5 вставлена в паз вала II и одним (правым) концом закрепляется осью в муфте 4 . Пружина 6 постоянно поджимает вытяжную шпонку вверх. Если шпонка находится против шпоночной канавки зубчатого колеса, то западает в нее, и происходит соединение колеса с валом. Кольца препятствуют одновременному включению двух зубчатых колес. Механизм с двумя конусами и вытяжной шпонкой применяют в основном в коробках подач сверлильных станков. Это объясняется тем, что такие механизмы в шпиндельной коробке располагаются по вертикали валами и при переключении вытяжная шпонка с муфтой, имеющие малую массу по сравнению с массой накидного зубчатого колеса с рычагом в механизме нортон, легко перемещаются при движении вверх. Ограничение хода вытяжной шпонки вправо производится упорным кольцом 3 , а влево — концом шпоночного паза. Достоинство этих механизмов — компактность. Недостаток — быстрый износ и потеря формы шпоночных канавок в зубчатых колесах.

В строгальных, долбежных, шлифовальных и других станках применяют прерывистую подачу. Подачу вертикального суппорта поперечно-строгаль-

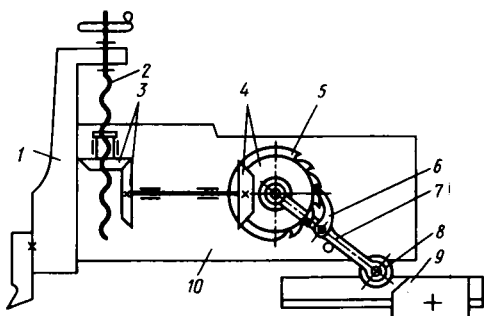


Рис. 18. Механизм прерывистой подачи вертикального суппорта поперечно-строгального станка

ного станка (рис. 18) в вертикальном направлении осуществляют таким образом: при движении ползуна 10 назад ролик 8 набегает на упор 9, происходит поворот рычага 7 с подпружиненной собачкой 6 и храпового колеса 5, конических колес 4 и 3. В последнем коническом колесе выполнена гайка, в которую ввинчен ходовой винт 2. Так как ходовой винт неподвижен относительно ползуна 10, происходит его перемещение, а вместе с ним и суппорта 1.

Рассмотрев несколько конструкций коробок подач, можно заметить, что большинство из них состоят из одних и тех же звеньев и механизмов — зубчатых колес, блоков, кулачковых муфт, ходового валика, а некоторые коробки включают типовые механизмы — миандр, конус Нортон, конусные наборы с вытяжной шпонкой, что характеризует общность их конструкций.

С ростом мощности станков и повышением точности обработки наиболее перспективными являются коробки скоростей с постоянными межосевыми расстояниями (см. рис. 17, б, г).

Фартуки. Фартук 12 (см. рис. 1) предназначен для передачи движения от коробки подач к суппорту (или столу). Передача движения происходит с помощью ходового валика, зубчатых колес, червячной передачи, муфт и реечной передачи или непосредственно ходовым винтом и маточной гайки, смонтированных в корпусе фартука.

Поскольку движения от ходового валика и ходового винта независимы, во

избежание одновременного их включения в корпусе фартука выполняют блокирующий механизм. Кинематическая схема фартука токарно-винторезного станка мод. 16К20 показана на рис. 10. Движение от ходового валика на реечное колесо $z = 10$, осуществляющего продольную подачу суппорта, передается через зубчатые колеса:

$$i_{\phi 1} = \frac{30}{32} \frac{32}{32} \frac{32}{30} \frac{4}{21} \frac{36}{41} \frac{41}{41} \frac{17}{66} = \frac{1}{23,21},$$

где $i_{\phi 1}$ — передаточное отношение цепи фартука при включении на продольную подачу.

Передача движения от ходового валика на ходовой винт поперечной подачи суппорта осуществляется по цепи фартука:

$$i_{\phi 2} = \frac{30}{32} \frac{32}{32} \frac{32}{30} \frac{4}{21} \frac{36}{36} \frac{34}{55} \frac{55}{29} \frac{29}{16} = \frac{1}{2,47},$$

где $i_{\phi 2}$ — передаточное отношение цепи фартука при включении на поперечную подачу.

Движение от ходового валика на гайку перемещения верхнего суппорта осуществляется по следующей цепи:

$$i_{\phi 3} = \frac{30}{32} \frac{32}{32} \frac{32}{30} \frac{4}{21} \frac{36}{36} \frac{34}{55} \frac{55}{29} \frac{29}{18} \times \frac{20}{20} \frac{20}{23} \frac{23}{30} \frac{30}{28} \frac{28}{35} \frac{20}{20} = \frac{1}{4,32},$$

где $i_{\phi 3}$ — передаточное отношение цепи фартука при включении на подачу верхнего суппорта.

В некоторых моделях станков в фартук вводится предохранительный механизм (падающий червяк, шариковая муфта и т. п.). Предохранительный механизм служит не только для предохранения от перегрузок, но и для работы суппортом по упору. Схема предохранительного механизма станка модели 16К20 показана на рис. 10. Для осуществления быстрого хода суппорта сзади станка установлен привод (см. рис. 10), передающий движение от электродвигателя М1 на ходовой валик с помощью клиноременной передачи шкивами $\frac{85}{127}$.

§ 1. Суммирующие механизмы

Для расширения диапазона настроек кинематических цепей в металлорежущих станках применяется суммирование движений. В качестве суммирующих механизмов применяются винтовые, реечные, червячные, планетарные и дифференциальные передачи. Суммирующие механизмы применяются в зуборезных, затыловочных, резьбошлифовальных и других станках.

Основным элементом дифференциального винта является винтовая пара (рис. 19,а). Она состоит из стаканообразной гайки 3 и ввинченного в нее винта 4. Приводом гайки является валик 1, смонтированный в подшипнике 2, позволяющий осуществлять только вращательное движение гайки.

Шейка ходового винта охвачена вилкой 5, которая может перемещаться в осевом направлении. Таким образом, ходовой винт может совершать одновременно и вращательное и поступательное движение. Резьба винтовой пары (гайки 3 и ходового винта 4) выполнена с большим шагом T , вследствие чего она полая и несаморазматывающаяся (в затыловочных станках T выбирают равным шагу спиральной канавки затылуемой червячной фрезы T_f , величина которого может быть больше метра).

Рассмотрим суммирование движений дифференциальным винтом. Если принять вилку 5 неподвижной, а гайке 3 сообщить n оборотов, то ходовой винт сделает тоже n оборотов. Допустим, что гайка неподвижна, а ходовой винт перемещается на величину l , тогда он сделает l/T оборотов. Если произвести одновременно вращательное дви-

жение гайки и поступательное — ходового винта, то на ходовом винте возникает суммарное движение, равное $(n \pm \frac{l}{T})$ оборотов.

Суммирующий механизм может состоять из рейки 1 и реечного колеса 2 (рис. 19,б). Если одновременно в продольном направлении перемещать рейку на величину l_1 , а реечное колесо на l_2 , то на реечном колесе возникнет суммарное перемещение $\frac{l_1 \pm l_2}{\pi d}$ (об.), где d — средний диаметр реечного колеса.

Червячная пара. Большое число вариантов суммирования движений можно получить с помощью червячной пары. Принимая поочередно ведущим звеном червяк и червячное колесо, суммарное движение может быть или на червячном колесе или на червяке. Принимаем червяк 1 ведущим, а червячное колесо 2 ведомым (рис. 20,а). Сообщим червяку n оборотов, тогда червячное колесо сделает $n \frac{z_1}{z_2}$ оборотов.

Перемещение червяка в осевом направлении на величину l вызывает дополнительные обороты червячного колеса $(\frac{l}{z_2 P})$ об., где z_2 — число зубьев колеса, P — шаг червяка). Одновременное вращательное и поступательное движения червяка вызовут суммарное перемещение на червячном колесе (об.): $n \frac{z_1}{z_2} \pm \frac{l}{z_2 P}$.

Если принять червяк 1 (рис. 20,б) ведущим и осуществляющим только одно вращательное движение, а червячное колесо 2 помимо вращательного движения будет перемещаться вдоль

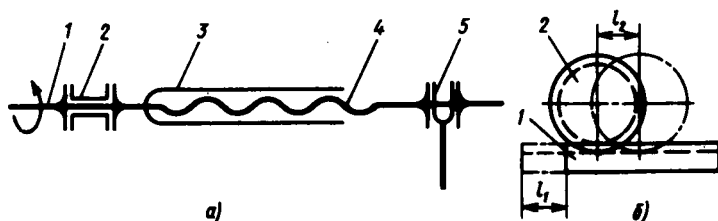


Рис. 19. Суммирующие механизмы

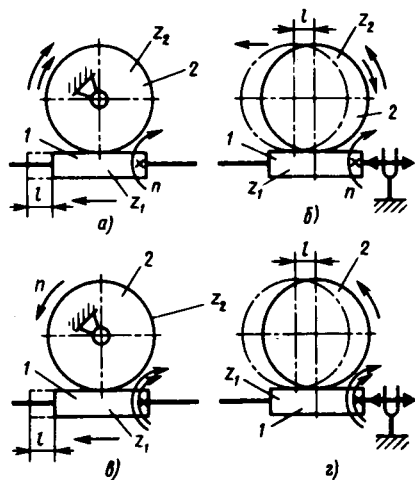


Рис. 20. Суммирование движений червячной пары

червяка на величину l , то на червячном колесе возникнет суммарное вращательное движение (обороты червячного колеса)

$$n \frac{z_1}{z_2} \pm \frac{l}{z_2 P}.$$

Теперь предположим, что червяк 1 (рис. 20, в) ведомый, а червячное колесо 2 ведущее. Сообщаем червячному колесу n оборотов, тогда червяк сделает $n \frac{z_2}{z_1}$ оборотов. При перемещении в продольном направлении на величину l червяк сделает $\frac{l}{z_1 P}$ оборотов, где z_1 — число заходов червяка.

При вращении червячного колеса и одновременно поступательном перемещении червяка на червяке возникнет суммарное перемещение (обороты червяка)

$$n \frac{z_2}{z_1} \pm \frac{l}{z_1 P}.$$

Принимаем червяк 1 ведомым, а червячное колесо 2 ведущим (рис. 20, г). Червячное колесо имеет вращательное и поступательное движение, а червяк имеет только вращательное. Тогда за n оборотов червячного колеса червяк совершит $\frac{z_2}{z_1}$ оборотов, а за тот же период при поступательном перемещении червячного колеса на величину l он

сделает $\frac{l}{z_1 P}$ дополнительных оборотов. Суммарное число оборотов на червяке $n \frac{z_2}{z_1} \pm \frac{l}{z_1 P}$.

Подобного рода суммирование движений (червячной парой) можно видеть в станках для обработки червяков чашечным резцом, в зубофрезерных станках при обработке зубчатых колес с осевой подачей червячной фрезы.

Планетарная передача. Планетарные передачи применяют в металлорежущих станках как суммирующие, так и понижающие оборотность конечных звеньев цепи, например шпинделя, ходового винта, т. е. они заменяют редуктор.

Одноприводная планетарная передача, применяемая в станках для глубокого сверления, показана на рис. 21, а. В ней поводок является шкивом, а вал 1 — шпинделем. Передаточное отношение этой планетарной передачи подсчитываем по правилу Швампа, по которому следует: 1) всем звеньям планетарного механизма сообщить +1 оборот; 2) неподвижному звену сообщить -1 оборот; 3) записать передаточное отношение между неподвижным и ведомым и проверить знак; 4) суммировать значения по первому и второму пунктам. Это и есть передаточное отношение планетарного механизма:

$$i = 1 - \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4}.$$

Двухприводные планетарные передачи применяют в станках для суммирования движений, например в зубострогальных станках фирмы Hagbesk в мод. КН-15 и КН-50 (рис. 21, б).

В планетарной передаче движение на валик 3 передается от первого привода корпуса 1 и второго — валика 2.

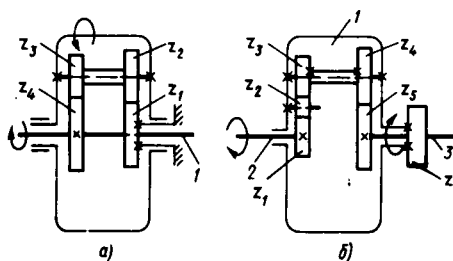


Рис. 21. Суммирующие планетарные передачи

Передаточное отношение двухприводных планетарных передач можно определить:

$$i = 1 + \frac{z_1}{z_3} \frac{z_4}{z_5}; \quad n_3 = n_2 \left(1 + \frac{z_1}{z_3} \frac{z_4}{z_5} \right) + n_1 \frac{z_1}{z_3} \frac{z_4}{z_5},$$

где n_2, n_3 — частоты вращения валов 2, 3, об/мин; n_1 — частота вращения корпуса 1, об/мин.

Конический дифференциал — суммирующий механизм, выполненный из конических зубчатых колес. На рис. 22,а показан конический дифференциал, состоящий из неподвижного конического колеса z_1 , Т-образного вала 1 с сателлитами z_2 и z_4 (ведущего) и ведомого z_3 конического колеса. При вращении Т-образного вала сателлиты z_2 и z_4 катятся по неподвижному колесу z_1 и передают движение ведомому колесу z_3 . Для определения передаточного отношения построим график скоростей, приняв точку С за мгновенный центр качения сателлита z_2 по неподвижному колесу z_1 . На графике скоростей v_1 — скорость точки колеса z_2 , находящейся от точки С на расстоянии радиуса колеса R , создаваемая вращением Т-образного вала; v_2 — скорость точки колеса z_2 , расположенной на расстоянии диаметра D от точки С, соответствующая окружной скорости ко-

леса z_3 . Тогда передаточное отношение конического дифференциала при вращении Т-образным валу составит

$$i_1 = \frac{v_2}{v_1} = \frac{D}{R} = 2.$$

Конический дифференциал может создавать различные варианты передаточных отношений. Так, на рис. 22,б показан дифференциал, у которого коническое колесо z_1 неподвижно, Т-образный вал ведомый, коническое колесо z_3 ведущее. В этом случае передаточное отношение

$$i_2 = \frac{v_1}{v_2} = \frac{R}{D} = \frac{1}{2}.$$

Если Т-образный вал неподвижен (рис. 22,в), зубчатое колесо z_1 ведущее, а z_3 — ведомое, то передаточное отношение

$$i_3 = \frac{z_1}{z_2} \frac{z_2}{z_3} = 1.$$

При суммировании движений конический дифференциал имеет два привода. Так, на рис. 22,г показана схема дифференциала, у которого ведущими звеньями являются Т-образный вал и коническое колесо z_3 , а ведомым — колесо z_1 . Тогда суммарное передаточное отношение $i_4 = 2 \pm 1 = 3$; 1. Знак плюс или минус зависит от на-

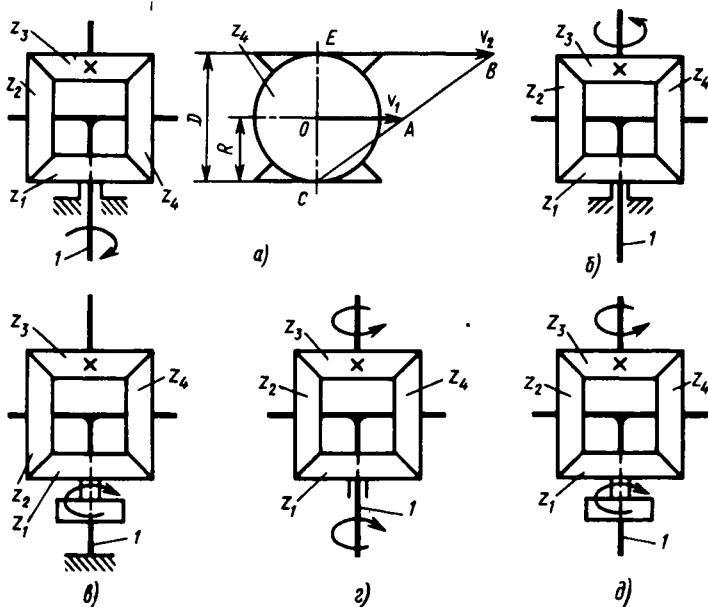


Рис. 22. Типы дифференциалов

правления вращения ведущих звеньев. Если же ведущими звеньями будут колеса z_1 и z_3 , а ведомым Т-образный вал (рис. 22, д), то суммарное передаточное отношение $i_5 = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} = 1; 0$.

§ 2. Простые и дифференциальные цепи. Назначение станков с дифференциальными цепями

Простой кинематической цепью называется такая цепь, у которой от одного конечного звена к другому передается только одно движение, например, у винторезной цепи (см. рис. 9) от шпинделя к суппорту передается только одно движение (при данной наладке).

Уравнение баланса простой винторезной цепи

$$1 \text{ об. шп. } P i_x = P_n. \quad (1)$$

Дифференциальной кинематической цепью называется такая, которая дополняет движение конечному звену. В результате суммируются два движения.

Преобразуем простое уравнение баланса винторезной цепи (1) в дифференциальное уравнение баланса путем замены i суммой:

$$i = i_1 + i_2$$

и подстановки в уравнение баланса (1) получим

$$1 \text{ об. шп. } (i_1 + i_2) P = P_n, \quad (2)$$

где P — шаг ходового винта; P_n — шаг нарезаемой резьбы.

Уравнение (2) есть уравнение баланса дифференциальной винторезной це-

пи, так как левая его часть представляет сумму. Построим по уравнению (2) кинематическую цепь (рис. 23). Из кинематической цепи видно, что перемещение гайки 2 ходового винта, а следовательно, и перемещение суппорта 1 вдоль станка складывается из поворота ходового винта и поворота гайки 2. Настройку вращения на обороты ходового винта осуществляют гитарой i_y , а ходового валика 3 и гайки 2 — i_x . Наличие двух неизвестных в одном уравнении может дать бесконечно большое число решений, поэтому дифференциальные цепи имеют больший диапазон настройки, чем простые, и делают станок более универсальным.

Станки с дифференциальными кинематическими цепями используются для обработки деталей, образованных сложными поверхностями, например, для нарезания цилиндрических колес с косыми зубьями, затылования червячных фрез и т. д. Обработка таких поверхностей требует осуществления сложных настроек кинематических цепей. Для решения вопроса задания точного движения на обрабатываемой заготовке вводят дополнительную дифференциальную кинематическую цепь. В данном случае при работе станка на заготовке (инструменте) происходит суммирование движений. Например, в зубофрезерном станке при обработке цилиндрических колес с косыми зубьями на заготовке суммируются два движения: от инструмента (червячной фрезы) на заготовку, через гитару обкатки и от ходового винта через гитару дифференциальной цепи.

Дифференциальные цепи значительно расширяют диапазон и точность настроек станков.

§ 3. Точные и приближенные настройки кинематических цепей

Настройка кинематических цепей. При настройке кинематических цепей металлорежущих станков всегда движение одного конечного звена цепи строго координируется с другим конечным звеном. В одних случаях требуется абсолютная точность в согласовании движений, в других — допускается некоторая погрешность и согласо-

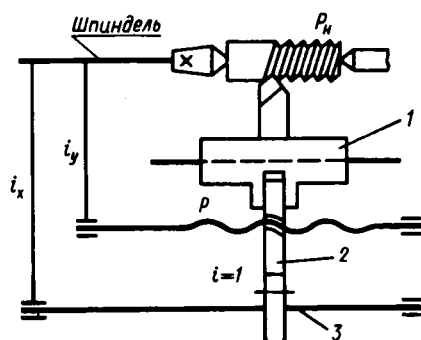


Рис. 23. Схема винторезной цепи

вание движений может быть лишь приближенным. Поэтому, прежде чем приступить к настройке станка, необходимо выяснить, какие именно движения следует сообщить обрабатываемой детали и инструменту и какая зависимость должна быть между этими движениями. Независимо от сложности станка методика кинематической настройки во всех случаях одинакова и состоит в подборе сменных зубчатых колес гитар. Для решения задач по наладке кинематических цепей предложен ряд методов подбора сменных колес гитар. Их можно разделить на точные и приближенные.

Точная настройка. Точный метод подбора сменных колес состоит в том, что числитель и знаменатель передаточного отношения гитары, представленного простой дробью, разлагают на простые множители, а затем умножением (делением) числителя и знаменателя на одно и то же число образуют числа зубьев сменных колес:

$$i_x = \frac{P_n}{P} = \frac{2,5 \cdot 4}{1 \cdot 25,4} = \frac{25 \cdot 20}{10 \cdot 127} = \frac{25 \cdot 60}{30 \cdot 127} = \frac{60 \cdot 25}{30 \cdot 127}.$$

Иногда не удается осуществить точный подбор сменных колес нормального комплекта, поэтому применяют приближенные способы подбора, которые могут обеспечить заданную точность шага нарезаемой резьбы.

Приближенная настройка. Рассмотрим способ прибавления (вычитания) малых чисел к передаточному отношению. При этом способе к числителю и знаменателю передаточного отношения прибавляют (или вычитают) число, удобное для разложения на простые множители.

Пусть передаточное отношение гитары $i_x = \frac{z_1}{z_2}$ но, z_1 и z_2 такие числа, которые не соответствуют числам зубьев сменных колес нормального комплекта, следовательно, точная настройка гитары невозможна. Производим приближенную настройку. Для этого прибавляем к числителю и знаменателю малое число c и получаем новое,

приближенное передаточное отношение $i_{x1} = \frac{z_1 + c}{z_2 + c}$, причем i_{x1} близко по своему значению к i_x .

Установим, от чего зависит величина погрешности приближенной настройки. Для этого исследуем разность передаточных отношений:

$$\Delta i_x = i_x - i_{x1} = \frac{z_1}{z_2} - \frac{z_1 + c}{z_2 + c} = \frac{(z_1 - z_2)c}{z_2(z_2 + c)}.$$

Следовательно, чтобы ошибка была минимальной, $c=1$, а z_1 и z_2 близки по своему значению друг к другу, т. е. $z_1 - z_2 = 1$, тогда

$$\Delta i_x = \frac{1}{z_2^2 + z_2}.$$

Таким образом, метод прибавления или вычитания малых чисел пригоден в том случае, когда передаточное отношение близко к единице или возможно преобразовать передаточное отношение так, чтобы часть его представляла отношение, близкое к единице. Этот способ удобен при подборе сменных колес в три пары.

При анализе погрешности настройки определяют абсолютную, относительную и суммарные погрешности. Абсолютная погрешность Δi_x есть разность между полученным i_{x1} и заданным i_x передаточными отношениями. Относительная погрешность δ есть отношение абсолютной погрешности к заданному передаточному отношению.

Суммарная погрешность ΔL приближенной настройки есть произведение относительной погрешности δ на длину L обрабатываемой детали.

Подбор сменных зубчатых колес производят по таблицам М. Н. Петрик и В. А. Шишкова [40]. По таблицам сравнительно просто и с большой точностью можно подобрать сменные колеса гитар. В них непосредственно указаны числа зубьев ведущих и ведомых пар зубчатых колес. При этом для подавляющего числа случаев настройки достаточно применять 29 зубчатых колес с числами зубьев 23, 25, 30, 33, 37, 40, 41, 43, 45, 47, 50, 53, 55, 58, 60, 61, 62, 65, 67, 70, 73, 79, 83, 85, 89, 92, 95, 98, 100.

В таблицах для подбора сменных колес передаточное отношение выражено десятичной дробью с точностью до

10⁻⁷. По ним находят число, близкое к полученному, и с правой стороны выписывают числа зубьев сменных колес. Если заданное передаточное отношение выражено правильной дробью, т. е. числитель меньше знаменателя, первую пару зубчатых колес, данную в таблице, считают ведущей. Если же дробь неправильная, то ее переворачивают, переводят в десятичную дробь с точностью до 10⁻⁷, находят по таблицам число, близкое к полученному, и с правой стороны выписывают числа зубьев сменных колес, при этом ведущими считают вторые два колеса.

$$i_x = \frac{P_n}{P_x} = \frac{3.2}{25.4} = 0,2362204.$$

$$\delta = \frac{(i_{x1} - i_x)}{i_x} = \frac{(0,2362169 - 0,2362204)}{0,2362204} = -0,0000148.$$

$$\Delta L = \delta L = -0,0000148 \cdot 1000 = -0,0148 \text{ мм.}$$

Расчет настройки зубофрезерного станка мод. 5К324А. Рассмотрим алгоритм расчета настройки дифференциальной кинематической цепи зубофрезерного станка мод. 5К324А при нарезании косозубых цилиндрических колес. Формула настройки гитары имеет вид

$$i_\varphi = \frac{7,95775 \sin \beta}{m_n z_\Phi},$$

где β — угол винтовой нарезки зубчатого колеса; m_n — нормальный модуль; z_Φ — число заходов червячной фрезы. Передаточное отношение гитары $i_\varphi = \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4}$.

Для однопарной гитары расчет можно производить с помощью ЭКВМ (электронной клавишной вычислительной машины).

Определение $z_1 - z_4$ для двухпарной гитары, удовлетворяющих i_φ с заданной точностью Δi_φ , трудоемко и может быть выполнено с помощью ЭВМ (электронно-вычислительных машин) типа «Мир», «Наири», ЕС-1020, Минск-32.

В блок-схему программы расчета настройки гитары дифференциальной кинематической цепи (рис. 24) входит блок 2, который задает кроме i_φ и Δi_φ величины максимального $z_{\max}$ и минимального $z_{\min}$ числа зубьев колес (например, 100 и 24), значения максимальной α и минимальной β суммы зубьев зубчатых колес в парах $\frac{z_1}{z_2}, \frac{z_3}{z_4}$ (соответственно $\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2$). В блоке 3 происходит присваивание z_2 и z_4 величин $z_{\max}$, и далее в блоке 4 вычисляются значения $a = z_2 z_4 (i_\varphi + \Delta i_\varphi)$ и $b = z_2 z_4 (i_\varphi - \Delta i_\varphi)$. Если разность между величинами a и b есть целое число (в блоке 5 $[a-b]$ — означает целую часть от $a-b$), то процесс вычислений продолжается при выбранных z_2 и z_4 . Если $a-b$ — дробное число, то величина z_2 уменьшается на единицу (блок 12). В блоке 6 величине z_1 присваивается значение

$$z_{\min}. \text{ Вычисляется } z_3 = \left[\frac{a}{z_1} \right] \text{ (блок 7)}$$

и оценивается погрешность настройки передаточного отношения (блок 8). Если эта погрешность меньше Δi_φ , проверяется z_3 (блок 17). В случае, если $z_3 < z_{\max}$, проверяются условия зацепления (блок 18) и печатаются результаты $z_1, z_2, z_3, z_4, \Delta i_\varphi$. Если условия в блоке 17 не выполняются, происходит наращивание z_1 (блок 9), причем $z_1 < z_{\max}$ (блок 10) и $z_1^2 < a$ (блок 11). Если условия в блоках 10, 11 и 18 не выполняются, переходим к блоку 12. Далее проверяется ограничение по $z_2 z_4$ (блок 13), если оно выполняется, то вычисляются a и b (блок 4), если нет, то уменьшается на единицу величина z_4 , а z_2 присваивается значение $z_{\max}$ (блок 14). z_4 уменьшается до величины $z_{\min}$ (блок 15). Достижение z_4 величины $z_{\min}$ будет значить, что в диапазоне $z_{\max} \div z_{\min}$ нельзя получить настройку гитары дифференциальной кинематической цепи с заданной погрешностью Δi_φ , поэтому в блоке 16 погрешность удваивается и расчет повторяется вновь.

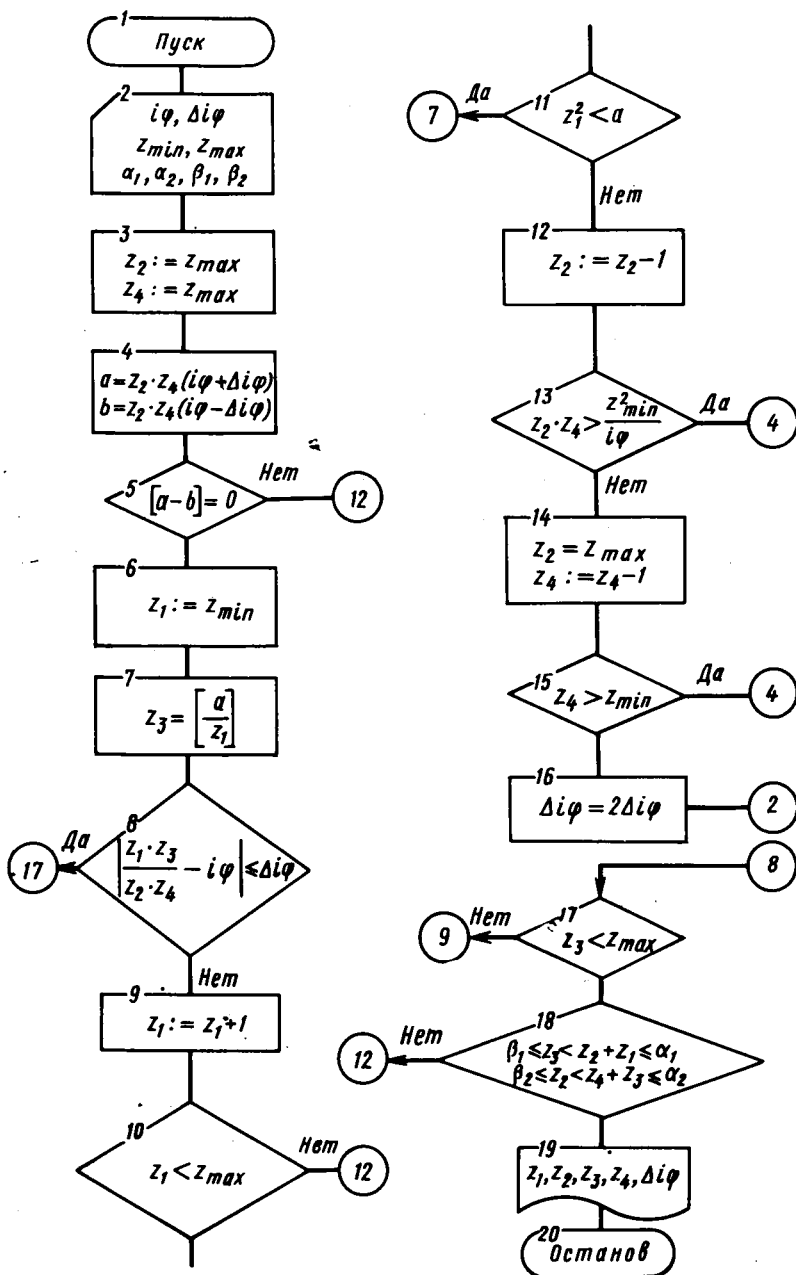


Рис. 24. Блок-схема программы расчета настройки гитары дифференциальной кинематической цепи

Для расчета на ЭВМ настройки гитары составляют программу, которую в виде перфоленты или перфокарт с алфавитно-цифрового печатающего устройства вводят в машину. В программе согласно алгоритму необходимо предусмотреть ввод исходных данных: передаточное отношение i_φ , допустимое отклонение передаточного отношения Δi_φ , максимальные и минимальные чис-

ла зубьев сменных зубчатых колес $z_{\max}$ и $z_{\min}$ и значения минимальной и максимальной суммы числа зубьев в парах z_1, z_2 и z_3, z_4 . На печать необходимо предусмотреть вывод $z_1 - z_4$ и допускаемой погрешности отклонения передаточного отношения Δi_φ . Программа является универсальной, меняя исходные данные можно получить расчет настройки гитары любого станка (за-

тыловочного, зубодолбежного, зубошлифовального и т. д.).

Непременным условием для реализации настройки кинематических цепей станков с заданной точностью является достаточно широкий набор сменных колес. Чем шире диапазон чисел зубьев сменных колес, тем с большей точностью может быть получено передаточное отношение гитары.

§ 4. Делительные механизмы

Делительные механизмы предназначены для кругового и продольного деления при обработке деталей машин и приборов, например зубчатых колес, делительных лимбов, линеек и т. п. К делительным механизмам относят делительные приспособления, головки и машины.

Делительные приспособления — это механизмы непосредственного деления, при котором ошибка между делительными отверстиями лимба целиком переносится на обрабатываемую деталь. Их применяют, когда нет необходимости в точном делении, например при обработке граней головок болтов. На рис. 25 показано приспособление для кругового деления. Погрешность деления лимба $\Delta\alpha_0$ (α — угол поворота лимба и детали) будет передаваться на погрешность поворота детали $\Delta\alpha$, т. е. $\Delta\alpha_0 = \Delta\alpha$.

Делительные головки предназначены для точных периодических поворотов заготовки на равные или неравные доли окружности. Их применяют при обработке различных режущих инструментов (метчиков, разверток, зенкеров, фрез и т. д.), зубчатых колес и фа-

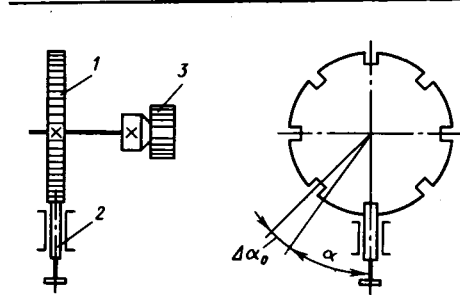


Рис. 25. Приспособление для кругового деления:

1 — лимб; 2 — фиксатор; 3 — деталь

сонных деталей. С помощью делительных головок производят более точное деление, чем с помощью делительных приспособлений, за счет передаточного отношения червячной пары, введенной в механизм делительной головки.

Большое влияние на точность делительных процессов оказывает передаточное отношение делительной цепи. Простой делительный механизм для кругового деления (рис. 26, а) состоит из лимба 1, пары цилиндрических зубчатых колес z_1 и z_2 , шпинделя 2.

Уравнение делительной цепи

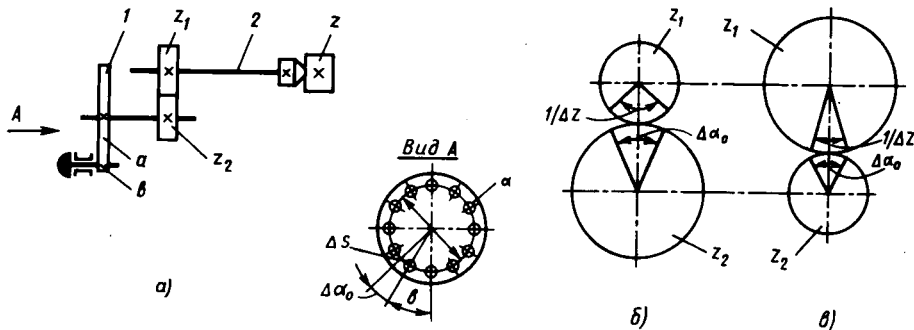
$$\frac{b}{a} \frac{z_2}{z_1} = \frac{1}{z},$$

где b — число отверстий, на которое нужно повернуть рукоятку, чтобы произвести делительный процесс; a — число отверстий на делительной окружности лимба; z — число зубьев на обрабатываемом колесе.

Погрешность расстояния между делительными отверстиями лимба будет передаваться на деталь. Напишем уравнение погрешности

$$\Delta\alpha_0 \frac{z_2}{z_1} = \Delta \frac{1}{z},$$

Рис. 26. Схема делительного процесса



где $\Delta\alpha_0$ — ошибка между делительными отверстиями лимба; $\Delta\frac{1}{z}$ — дополнительный поворот заготовки вследствие ошибки на лимбе; $\frac{z_2}{z_1}$ — передаточное отношение.

Из уравнения видно, что если $z_2 = z_1$, то $\Delta\alpha_0 = \Delta\frac{1}{z}$, или $z_2 > z_1$, то $\Delta\alpha_0 < \Delta\frac{1}{z}$ (рис. 26, б). Если $z_2 < z_1$, то $\Delta\alpha_0 > \Delta\frac{1}{z}$ (рис. 26, в).

Следовательно, чем меньше по абсолютной величине передаточное отношение $\frac{z_2}{z_1}$, тем больше уменьшается погрешность лимба на делительном повороте детали. Поэтому для уменьшения погрешности поворота в делительных цепях применяют червячную пару.

Рассмотрим влияние диаметра делительной окружности на точность деления, для этого напишем уравнение погрешности, в которое вошел бы диаметр делительной окружности D (см. рис. 26, а):

$$\frac{\Delta S}{\pi D} \frac{z_2}{z_1} = \Delta_1 \frac{1}{z},$$

где ΔS — ошибка в длине дуги между делительными отверстиями (поворот рукоятки), мм, $\Delta_1 \frac{1}{z}$ — ошибка углового поворота детали, вызванная ΔS .

Из уравнения следует, если принять ошибку между делительными отверстиями на всех делительных окружностях одинаковой, то для повышения точности делительного поворота нужно брать больший диаметр D делительной окружности.

Простые делительные головки бывают лимбовые и безлимбовые. Шпиндель простых делительных головок всегда расположен только горизонтально. На рис. 27, а показана простая лимбовая делительная головка.

Цикловая работа простой лимбовой головки характеризуется уравнением баланса

$$\frac{b}{a} \frac{z}{z_0} = \frac{1}{z} \text{ при } K=1 \quad \frac{b}{a} = \frac{z_0}{z},$$

где b — число отверстий, на которое необходимо повернуть рукоятку

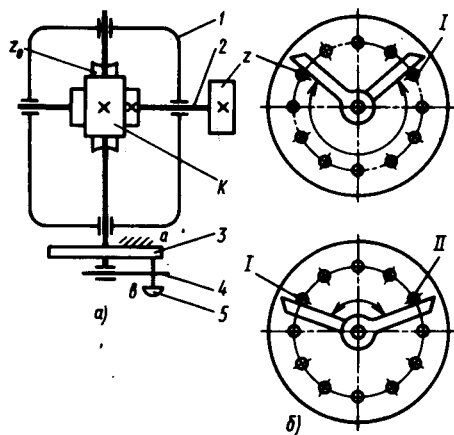


Рис. 27. Простая лимбовая делительная головка: 1 — корпуса; 2 — шпиндель; 3 — лимб; 4 — делительная рукоятка; 5 — фиксатор; Kz_0 — червячная передача

при делительном процессе; a — число отверстий на делительной окружности лимба; z — число делений, на которое необходимо разделить заготовку; z_0 — число зубьев червячного колеса делительной головки; K — число заходов червяка.

К простым делительным головкам прилагаются три сменных лимба, имеющих следующее число отверстий на делительных окружностях: первый лимб — 15, 16, 17, 18, 19, 20; второй лимб — 21, 23, 27, 29, 31, 33; третий лимб — 37, 39, 41, 43, 49.

Для удобства отсчета делительных отверстий при перемещении рукоятки 4 на лимбе 3 расположен угольник (рис. 27, б). При повороте рукоятки на требуемый угол от положения I до положения II угольник остается неподвижным, а при последующем отсчете угольник сдвигается до фиксатора 2. На рис. 27, б показаны два типичных случая раствора ножек угольника.

Простые делительные головки иногда оформляют в виде делительных столов.

Универсальные делительные головки (рис. 28) отличаются от простых тем, что имеют поворотную среднюю часть корпуса, в которую вмонтирован шпиндель. Это позволяет устанавливать шпиндель не только в горизонтальном положении, но и под углом, что необходимо, например, при нарезании конических зубчатых колес, конических разверток, дисковых кулачков и других деталей. Универсальные делительные

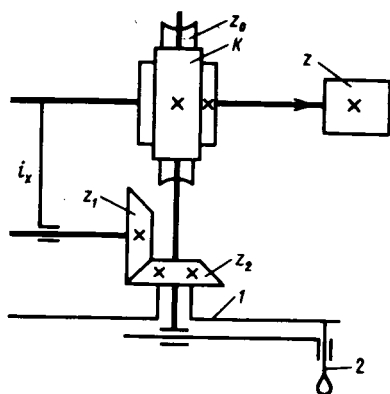


Рис. 28. Универсальная делительная головка:
1 — лимб; 2 — рукоятка

головки могут быть лимбовые и без-
лимбовые. Как правило, на них можно
осуществлять дифференциальную на-
стройку для деления, а также на-
стройку на фрезерование различных спи-
ралей.

Во время делительного процесса угол
поворота рукоятки относительно
лимба будет равен $-\frac{b}{a}$, (где b —
число отверстий, на которое поворачи-
вается рукоятка; a — число отверстий
на окружности лимба), в то же время
угол поворота лимба будет равен
 $\frac{1}{z} i_x \frac{z_1}{z_2}$ оборота.

Абсолютный поворот рукоятки за
делительный цикл будет равен $\frac{b}{a} +$
 $+\frac{1}{z} i_x \frac{z_1}{z_2}$.

Уравнение баланса можно записать
так:

$$\left(\frac{b}{a} + \frac{1}{z} i_x \frac{z_1}{z_2} \right) \frac{K_0}{z_0} = \frac{1}{z}.$$

В большинстве делительных головок
червяк однозаходный, поэтому для
дальнейшего вывода принимаем $K_0=1$.

Преобразуем уравнение баланса:

$$\frac{b}{a} \frac{1}{z_0} + \frac{1}{z} i_x \frac{z_1}{z_2} \frac{1}{z_0} = \frac{1}{z}.$$

Чтобы настроить делительную голов-
ку, в уравнении необходимо определить
два неизвестных $\left(\frac{b}{a}, i_x \right)$, для этого
прибавляем к правой части уравнения

$\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_1} = 0$, где z_1 — близкое к z число,
которым задаются; оно может быть
больше или меньше z (в пределах от 1
до 5):

$$\frac{b}{a} \frac{1}{z_0} + \frac{1}{z} i_x \frac{z_1}{z_2} \frac{1}{z_0} = \frac{1}{z} + \frac{1}{z_1} -$$

$$-\frac{1}{z_1}.$$

Расчленим это уравнение на два:

$$\frac{b}{a} \frac{1}{z_0} = \frac{1}{z_1}; \quad \frac{1}{z} i_x \frac{z_1}{z_2} \frac{1}{z_0} = \frac{1}{z} - \frac{1}{z_1}.$$

При $\frac{z_1}{z_2} = 1$ получим

$$\frac{b}{a} = \frac{z_0}{z_1}; \quad i_x = z_0 \left(1 - \frac{z}{z_1} \right).$$

К универсальным делительным голов-
кам прилагается только один лимб,
имеющий различные числа отверстий на
делительных окружностях с обеих его
сторон: первая сторона — 24, 25, 28,
30, 34, 37, 38, 39, 41, 42, 43; вторая
сторона — 46, 47, 49, 51, 53, 54, 57,
58, 59, 62, 66.

Оптические делительные головки
(рис. 29) все более широко применяют
как для обработки деталей, так и для
контроля изделий. Точность оптических
головок высока и лежит в пределах
 $+20''$. Делительный процесс произ-

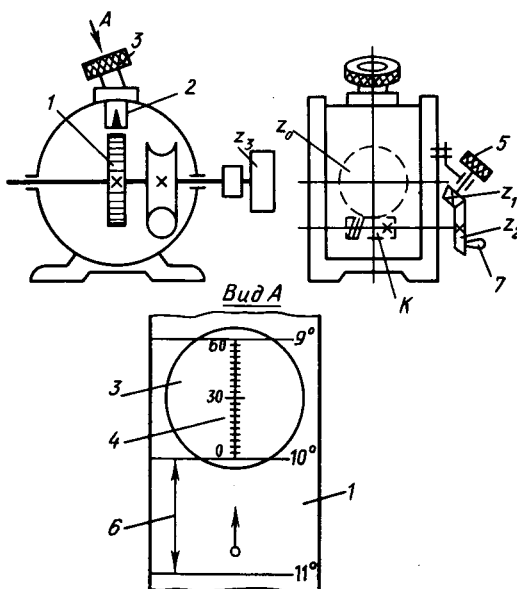


Рис. 29. Оптическая делительная головка

водится с использованием оптической системы, в которую входят стеклянный диск 1 с 360 делениями, трубки с призмой 2 и окуляр 3.

Для проворота шпинделя, а следовательно, заготовки и стеклянного диска 1, введена кинематическая цепь, состоящая из конических зубчатых колес z_1 и z_2 , червячной пары K и z_0 .

Формула настройки оптической делительной головки $\alpha = \frac{360^\circ}{z_3}$, где α — угол, на который необходимо повернуть стеклянный диск 1, чтобы осуществить делительный поворот детали на z_3 числе делений на заготовке.

Отсчет угла производят по шкалам стеклянного диска 1 и шкале нониуса 4, видимой в окуляр 3 (рис. 29). Предварительный поворот шпинделя и стеклянного диска производят рукояткой 7, а точный — барабанчиком 5. Расстояние между двумя соседними шкалами 6 стеклянного диска 1 соответствует 1° поворота шпинделя. Размер шкалы нониуса 4, видимой в окуляр 3, равен одному делению шкалы стеклянного диска

1. Шкала нониуса разделена на 60 частей (от 1 до 60), следовательно, каждое деление соответствует $1'$.

Продольно-делительная машина завода «Калибр» предназначена для нанесения линейных шкал на металлических, стеклянных и других заготовках.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наибольшая длина наносимой шкалы, мм	500
Расстояние между штрихами, мм	0,1—5
Интервал настройки, мм	0,01
Длина штрихов наносимой шкалы, мм	1—20
Допустимая погрешность между штрихами шкалы, мм	$\pm 0,01$
Максимальная производительность шт/мин	40

Предусмотрена возможность чередования коротких и длинных штрихов. Машина снабжена счетчиком, автоматически выключающим машину после нанесения последнего штриха делительной шкалы. Продольная делительная машина (рис. 30) состоит из следующих основных элементов: станины

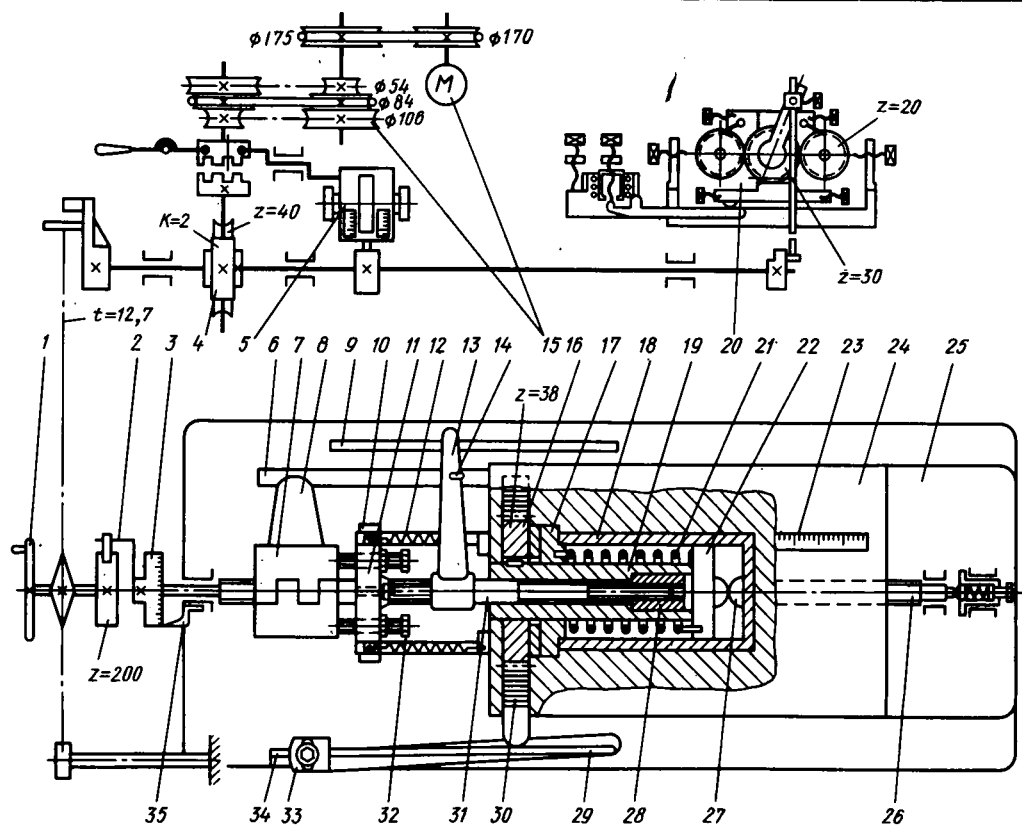


Рис. 30. Продольно-делительная машина завода «Калибр»

25, стола 24, резцовой головки 20, привода 15, редуктора 4 и счетчика 5. Стол служит для крепления заготовки 23, на которую наносят шкалы. Резцовая головка предназначена для крепления резцов и нанесения штрихов на заготовках. Приводом машины служит электродвигатель M ($N = 0,5$ кВт; $n = 800$ об/мин). Для нанесения на заготовку штрихов необходимо установить ее на рабочий стол и периодически перемещать с помощью ходового винта вместе со столом. Необходимая величина углового поворота ходового винта зависит от расстояния между соседними штрихами и осуществляется автоматически с помощью храпового устройства 2. Угловой поворот ходового винта вручную производится маховичком 1, а отсчет углового поворота лимбом 3, закрепленным неподвижно на ходовом винте, и указателем отсчета 35. При шаге ходового винта $P = 2$ мм и при лимбе с 1000 делениями поворот лимба на одно деление сопровождается перемещением гайки 7 ходового винта на 0,002 мм.

На станине расположены две коррекционные линейки: одна для корректирования шага ходового винта, а другая — для температурных компенсаций, позволяющая производить компенсацию линейных расширений делимых шкал при температуре, отличной от нормальной ($+20^\circ\text{C}$). Корректирующее устройство ходового винта и температурных компенсаций расположены в левой части рабочего стола. Рычаг 13 скользит по рабочему ребру коррекционной линейки 9 и жестко связан с винтом 31. Гайка 28 винта расположена неподвижно в выточке втулки 19, направляемой во время своего вращения крышкой 17 стакана 18 и крышкой 22 втулки 19. Пружина 14 прижимает рычаг 13 к рабочему ребру коррекционной линейки. На левом конце втулки 19 на шпонке расположено зубчатое колесо 16, которое сцеплено постоянно с зубчатой рейкой 30. Передний конец зубчатой рейки полукруглый и упирается в рабочее ребро температурной линейки 29. Зазоры между зубьями рейки и зубчатого колеса выбирают пружиной 21.

Эта же пружина одновременно прижимает передний конец рейки к рабочему ребру температурной линейки.

Плоская головка закаленного стержня, расположенного в поворотной скобе 11, прижимается к полукруглому левому концу винта 31 пружинами 12, поворачивающими скобу вокруг цапф 10. С помощью пружин 12 выбирают зазоры между нитками винта 31 и гайки 28, а также зазоры между опорными поверхностями подпятника 27.

Раскрывающаяся гайка 7 может быть установлена на том или ином месте ходового винта, в зависимости от положения рабочего стола относительно резцовой головки. Контакт между правыми выступами гайки и рабочим столом осуществляется с помощью винтов 32, которые стопорятся в нужном положении контргайками. При вращении ходового винта 26 автоматически посредством храпового устройства 2 или вручную маховичком 1 гайка 7 будет перемещаться слева направо, так как из-за рычага 8, опирающегося на направляющую 6, она вращаться не может. В результате перемещения гайки 7 будут передвигаться в том же направлении и упорные винты 32, винт 31, рычаг 13, рабочий стол 24 и зубчатая рейка 30. Так как рычаг 13 перемещается при этом по рабочему ребру коррекционной линейки, то он будет подниматься или опускаться, а винт 31 вывинчиваться или ввинчиваться в гайку 28, т. е. рабочий стол будет получать дополнительные перемещения в ту или другую сторону. Зубчатая рейка 30, перемещаясь по рабочему ребру температурной линейки, наклоненной под тем или иным углом к направлению движения стола, поворачивает зубчатое колесо 16, втулку 19 и гайку 28 в ту или другую сторону, т. е. рабочий стол перемещается дополнительно вправо или влево в зависимости от знака угла наклона температурной линейки.

При установке температурной линейки по шкале 33 на одно деление получаем температурную компенсацию 0,02 мм на длине 500 мм. Пользуясь нониусом 34, можно откладывать с достаточной точностью десятые доли деления.

Величину потребной температурной компенсации определяют по формуле

$$K = 500 (\alpha - \alpha_1) (T - T_1),$$

где α — температурный коэффициент линейного расширения материала ходового винта делительной машины ($\alpha = 0,000011$ для стали); α_1 — температурный коэффициент линейного расширения материала детали ($\alpha_1 = 0,000007$ для стекла); T — нормальная тем-

пература помещения ($+20^\circ\text{C}$); T_1 — действительная температура помещения.

Число делений, на которое нужно переместить левый конец температурной линейки, $p = \frac{K}{0,02}$.

Глава 3

Кинематика координатно-расточных, затыловочных и резьбообрабатывающих станков

§ 1. Анализ кинематики координатно-расточных станков

Координатно-расточные станки предназначены для обработки отверстий, к которым предъявляются высокие требования по точности, как диаметра, так и расположения относительно базовых поверхностей. Кроме того, на них возможно производить чистовое фрезерование, а также использовать как измерительные машины при контроле и точной разметке. Для точного измерения координатных перемещений применяют механические, оптико-механические и электронные системы.

Координатно-расточный станок мод. 2Д450АМФ2. Станок имеет числовое программное управление и автоматическую смену инструмента.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наибольший диаметр сверления, мм . . .	30
Наибольший диаметр расточки, мм . . .	200
Наибольшее перемещение стола, мм:	
в продольном направлении	1000
в поперечном направлении	630
Гарантируемая точность установки координат, мм:	
при работе вручную	0,006
по программе	0,010

При работе по программе на станке предусматриваются следующие режимы: автоматический, полуавтоматический, ввод информации вручную. Кинематическая схема станка приведена на рис. 31.

1. *Главное движение* (вращение расточного шпинделя) — осуществляется от регулируемого электродвигателя постоянного тока ($N_n = 2$ кВт, $n_n = 700$ об/мин) через клиноременную пе-

редачу и двухступенчатую коробку скоростей. Уравнение кинематического баланса

$$n_{эд} \frac{166}{182} \frac{33}{70} i_{к.с} = n_{шп},$$

где $n_{эд}$ — частота вращения электродвигателя; $i_{к.с}$ — передаточное отношение коробки скоростей, $i_{к.с1} = \frac{70}{40}$; $i_{к.с2} = \frac{19}{55}$; $n_{шп}$ — частота вращения шпинделя, об/мин.

Пределы частот вращения расточного шпинделя 32—2000 об/мин. Переключение ступеней коробки скоростей осуществляют с помощью двигателя РД-09, который через зубчатые колеса 20—30 поворачивает эксцентрик, перемещающий блок зубчатых колес.

2. *Движение вертикальной подачи* (перемещение гильзы шпинделя в вертикальном направлении) осуществляется от отдельного электродвигателя ЭЛПО/245М с широким диапазоном регулирования ($N_n = 0,245$ кВт, $n_n = 3600$ об/мин).

Вертикальная рабочая подача (мм/мин) включена муфта M_1 .

$$s_v = n_{эд} \frac{1}{38} \frac{22}{20} \frac{1}{56} \pi \cdot 3 \cdot 16.$$

Пределы рабочих подач шпинделя — от 2 до 250 мм/мин.

Ускоренная подача (мм/мин) включена муфта M_2 :

$$s_{в.у} = n_{эд} \frac{1}{38} \frac{53}{18} \frac{54}{17} \frac{22}{20} \frac{1}{56} \pi \cdot 3 \cdot 16.$$

ординат осуществляется движением стола по направляющим салазок и салазок по направляющим станины.

Перемещение стола и салазок осуществляется от двух независимых электродвигателей постоянного тока ЭЛ111/245 ($N_n = 0,245$ кВт, $n_n = 3600$ об/мин) с регулируемой в широком диапазоне частотой вращения, благодаря чему имеется возможность применять скорости перемещения, необходимые для фрезерования плоскостей, а также осуществлять ускоренные перемещения при установке координат. Уравнения кинематического баланса цепей продольного и поперечного перемещения стола:

$$n_{ад} \frac{2}{30} \frac{20}{20} \cdot 1 \cdot 10 = s_{пр};$$

$$n_{од} \frac{2}{30} \frac{20}{20} \cdot 1 \cdot 10 = s_{п}.$$

Установку оси отверстия на детали относительно оси шпинделя осуществляют перемещением стола или салазок, которое контролируют специальным оптическим устройством. Оно установлено на точных стеклянных линейках, закрепленных в одном случае на столе (подвижная линейка), в другом — на станине (неподвижная линейка).

§ 2. Анализ кинематики затыловочных станков

Затылование — это специальный вид обработки задних поверхностей зубьев режущих инструментов. Чаще всего затылуют зубья фрез: дисковых, цилиндрических с прямолинейными и спиральными стружечными канавками, резьбовых и червячных, а также зубья метчиков.

Фрезы с затылованными зубьями (рис. 32, а) перетачивают только по передним поверхностям зубьев, причем плоскость заточки проходит через ось фрезы, благодаря чему их профиль сохраняется неизменным. Поэтому фрезы, применяемые для обработки фасонных поверхностей, обязательно подвергают затылованию. Затылование зубьев обычно производят по архимедовой спирали.

Во время обработки заготовка 1 (рис. 32, б) равномерно вращается, а

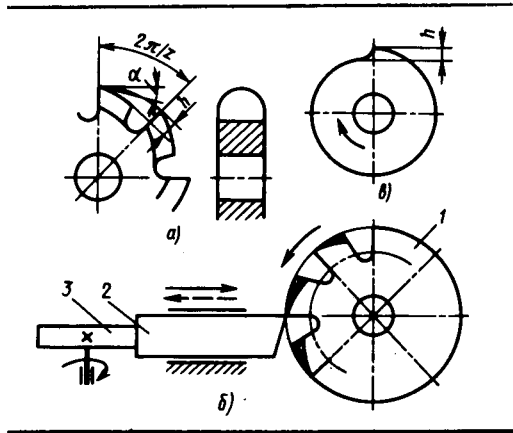


Рис. 32. Схема затылования зубьев фрез

резец 2 совершает поступательно-возвратное перемещение — движение затылования. Перемещение резца осуществляется от равномерно вращающегося кулачка 3 (рис. 32, б, в), профиль которого выбирают в зависимости от спада h затылка зуба фрезы. Приблизительно $h = \frac{\pi D}{z} \operatorname{tg} \alpha$, где D — диаметр фрезы; z — число зубьев фрезы; α — задний угол. Во время затылования за один оборот заготовки фрезы резец должен подойти к ней столько раз, сколько зубьев у фрезы.

При затыловании дисковых фрез, когда периметр профиля зуба невелик, применяют один фасонный резец. Во время обработки заготовка фрезы получает равномерное вращение, а резец — движение затылования и подачи на глубину резания. При затыловании цилиндрических фрез с прямолинейными стружечными канавками резец дополнительно перемещается параллельно оси заготовки (продольная подача). При затыловании цилиндрических фрез со спиральными стружечными канавками необходимо, чтобы резец, перемещаясь вдоль оси заготовки, следовал бы за спиральной линией зуба фрезы.

Рассмотрим вывод общего уравнения затылования на примере затылования червячной фрезы. Червячная фреза (рис. 33, а) имеет резьбовую нарезку с шагом P и спиральные стружечные канавки с шагом T , которые выполнены перпендикулярно винтовой нарезки. На рис. 33, б приведена развертка червячной фрезы, где kf — направление спиральной стружечной канавки, а линии,

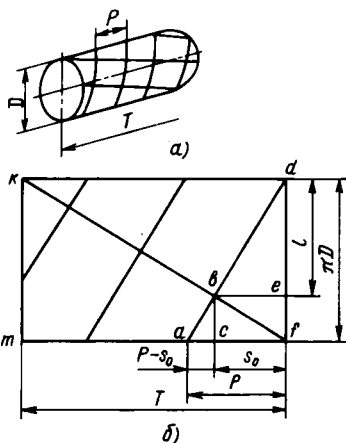


Рис. 33. Развертка червячной фрезы

перпендикулярные ей, — винтовая нарезка, D — диаметр червячной фрезы. Во время затылования резец при продольном перемещении должен за один цикл обработки переместиться на величину s_0 , для того чтобы он пришел в точку b , находящуюся на линии спиральной стружечной канавки.

Из подобия треугольников $\triangle adf \sim \triangle bde$ (рис. 33, б) $\frac{l}{\pi D} = \frac{be}{af} = \frac{s_0}{P}$ — обороты заготовки за один цикл затылования. Выразим отношение $\frac{s_0}{P}$ через известные величины P и T . Из подобия треугольников $\triangle abc \sim \triangle adf$ и $\triangle bfc \sim \triangle kfm$ получаем $\frac{bc}{\pi D} = \frac{P - s_0}{P}$ и $\frac{bc}{\pi D} = \frac{s_0}{T}$. Таким образом, $\frac{P - s_0}{P} = \frac{s_0}{T}$ или $\frac{P}{T} = \frac{P - s_0}{s_0} = \frac{P}{s_0} - 1$; $\frac{T + P}{T} = \frac{P}{s_0}$, и окончательно $\frac{s_0}{P} = \frac{T}{T + P}$.

За один цикл затылования кулачок должен выполнить один оборот, тогда уравнение кинематического баланса может быть записано $\frac{T}{T + P}$ об. заготовки.... 1 об. кулачка.

Однако расчет настройки цепи затылования обычно ведут на один оборот заготовки. Поэтому разделим обе части уравнения на величину $\frac{T}{T + P}$, тогда получим 1 об. заготовки... $\frac{T + P}{T}$ об. кулачка.

Это соответствует условию, что затылуемая фреза имеет один зуб. Если же затылуемая фреза имеет z зубьев, тогда 1 об. заготовки... $z \left(\frac{T + P}{T} \right)$ об. кулачка, или окончательно 1 об. заготовки... $z \pm \frac{zP}{T}$ об. кулачка.

Это и есть общее уравнение затылования. При затыловании цилиндрических фрез со спиральными стружечными канавками или червячных фрез первое слагаемое z выполняется цепью затылования, а второе $\frac{zP}{T}$ дифференциальной цепью. При затыловании цилиндрических фрез с прямолинейными стружечными канавками второе слагаемое равно нулю, так как $T = \infty$.

Затыловочный станок мод. 1Б811. Станок предназначен для затылования дисковых и фасонных фрез и инструмента с прямыми, косыми и торцовыми затылуемыми зубьями, а также червячно-модульных фрез с модулем до 8 мм. Кинематическая схема станка приведена на рис. 34.

1. *Главное движение* (вращение шпинделя или заготовки) осуществляется от двухскоростного асинхронного электродвигателя ($N = 3,0/4,5$ кВт, $n = 700/1400$ об/мин). Прямое вращение при $n = 700$ об/мин и обратное при $n = 1400$ об/мин.

Уравнение кинематического баланса имеет вид

$$n_{\text{шп}}(700) \frac{25}{56} \frac{34}{34} \frac{46}{46} \frac{45}{54} i_n = n_{\text{шп}}; \left(\frac{22}{46} \right) \left(\frac{28}{40} \right) \left(\frac{24}{68} \right)$$

$$i_{n1} = \frac{50}{50} \frac{24}{96}; i_{n2} = \frac{20}{80} \frac{24}{96},$$

где i_n — передаточное отношение перебора.

Коробка скоростей при рабочем ходе (прямое вращение) обеспечивает 12 частот вращения шпинделя в пределах $n_{\text{шп}} = 2,8 \div 63$ об/мин. Обратное вращение осуществляется реверсированием электродвигателя, при этом частота вращения в 2 раза выше, чем при рабочем ходе.

2. *Движение подачи* связывает вращение шпинделя с перемещением суп-

порта от механизма рейка — зубчатое колесо. Движение на коробку подач передается от шпинделя через цепную передачу $z=26$ и $z=34$.

Уравнение кинематического баланса (муфта M_5 включена) имеет вид

$$1 \text{ об. шп. } \frac{26}{34} \frac{44}{58} \frac{45}{36} i_{\text{ш}} \frac{25}{28} \frac{28}{25} \frac{1}{30} \times$$

$$\left(\frac{27}{54} \right)$$

$$\left(\frac{36}{45} \right)$$

$$\times \frac{20}{55} \pi 12 \cdot 3 = s_{\text{шп}},$$

где i'_n — передаточное отношение перебора.

При включенной муфте M_4 $i'_{n1} = 1$,
а при выключенной $i'_{n2} = \frac{27}{54} \frac{27}{54}$.

Коробка передач обеспечивает шесть продольных подач в пределах $s_{np} = 0,1 \div 1,0$ мм/об.

3. *Винторезное движение.* Передача движения от шпинделя на ходовой винт

происходит через трензель и двухпарную гитару настройки.

Настройка без звена увеличения шага:

1 об. шп. $\frac{54}{54} \frac{36}{36} \frac{36}{36} i_y 12 = P$, формула на-

стройки $i_y = \frac{P}{12}$, где P — шаг нарезаемой резьбы; i_y — передаточное отношение гитары настройки.

Настройка со звеном увеличения шага:

$$1 \text{ об. шш. } \frac{1}{i_{\text{ш}}} \frac{54}{54} \frac{36}{36} \frac{36}{36} i_{\text{ш}} 12 = P,$$

$$i_H = \frac{P i_H}{12}.$$

$$\text{При } i_{n1} = \frac{1}{4} i_{II} = \frac{P}{12.4}.$$

4. Движение затылования (деления) связывает вращение шпинделя (заготовки) с вращением кулачка затыло-

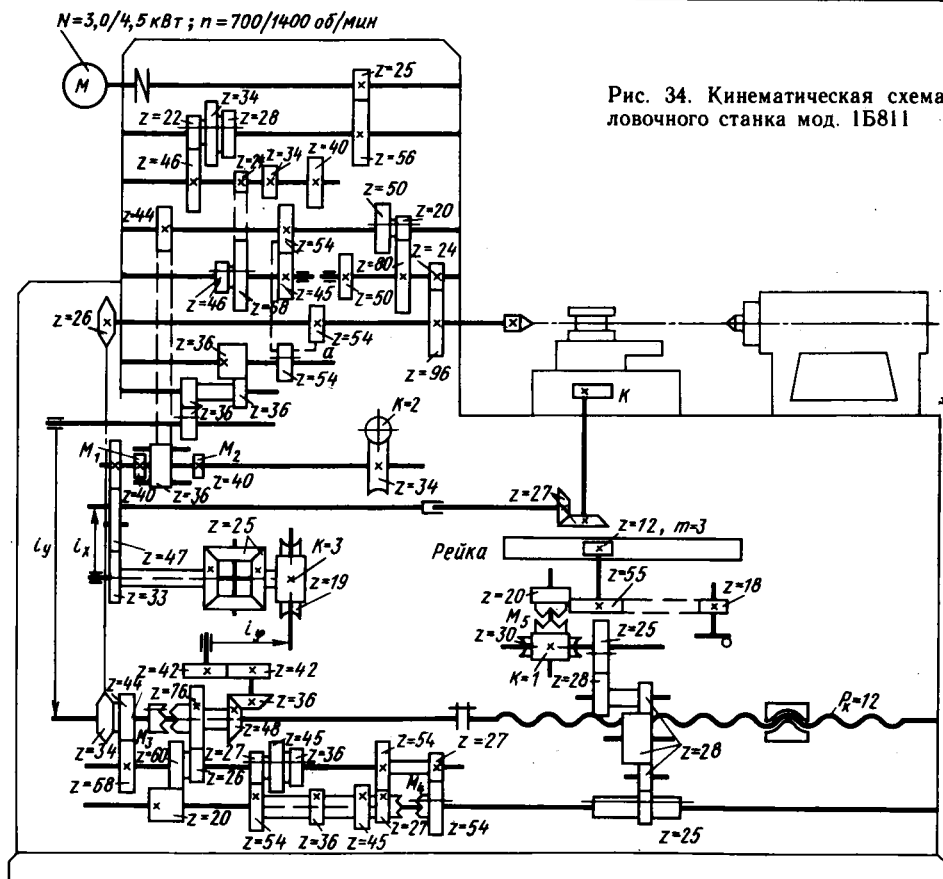


Рис. 34. Кинематическая схема заточного станка мод. 1Б811

вания. Кулачок, соприкасаясь с пальцем, запрессованным в плите суппорта, производит поступательно-возвратное движение резца. За один оборот детали кулачок должен совершить z об. к., где z число зубьев затылуемой детали, муфта M_1 включена:

$$1 \text{ об. шп. } \frac{1}{i_{\text{ш}}} \frac{44}{36} \frac{45}{47} \frac{27}{33} i_{\text{д1}} i_x \frac{27}{27} = z \text{ об. к.},$$

$$i_{\text{д1}} = \frac{1}{2}; \text{ формула настройки } i_x = \frac{6}{5} z i_{\text{ш}},$$

где $i_{\text{д1}}$ — передаточное отношение дифференциала.

$$\text{При } z = 1 \div 10, i_{\text{ш1}} = \frac{1}{4}, i_x = \frac{3z}{10}.$$

$$\text{При } z = 4 \div 40, i_{\text{ш2}} = \frac{1}{16}, i_x = \frac{3z}{40}.$$

5. Дифференциальное движение необходимо при затыловании фрез со спиральными стружечными канавками и обеспечивает дополнительный поворот кулачка затылования, от которого перемещается резец в радиальном направлении при продольном перемещении суппорта.

При передаче движения на суппорт через механизм ходовой винт — гайка уравнение кинематического баланса имеет вид, муфта M_3 включена

$$\frac{P}{12} \frac{48}{36} \frac{42}{42} i_{\text{ф}} \frac{3}{19} i_{\text{д2}} i_x \frac{27}{27} = \frac{Pz}{T},$$

$$\text{формула настройки } i_{\text{ф}} = \frac{114z}{Ti_x},$$

где $i_{\text{д2}} = \frac{1}{2}$ — передаточное отношение дифференциала, T — шаг спиральной стружечной канавки.

$$\text{При } i_x = \frac{3z}{10} \quad i_{\text{ф}} = \frac{380}{T}.$$

$$\text{При } i_x = \frac{3z}{40} \quad i_{\text{ф}} = \frac{1520}{T}.$$

При передаче движения на суппорт через механизм рейка — зубчатое колесо уравнение кинематического баланса имеет вид, муфта M_3 — выключена, муфта M_5 — включена:

$$\frac{P}{13 \cdot 12} \frac{55}{20} \frac{30}{1} \frac{25}{28} \frac{28}{25} \frac{20}{60} \frac{26}{76} \frac{48}{36} \frac{42}{42} \times \\ \times i_{\text{ф}} \frac{3}{19} i_{\text{д2}} i_x \frac{27}{27} = \frac{Pz}{T}, \quad i_{\text{ф}} = \frac{114 \cdot z}{Ti_x}.$$

При обработке фрез с правыми спиральными стружечными канавками в гитару дополнительно устанавливается паразитная сменная шестерня.

§ 3. Анализ кинематики резьбофрезерных станков

Резьбовые соединения широко применяются в машиностроении как для создания неподвижных соединений (болты, винты, гайки и т. д.), так и для подвижных (ходовой винт — гайка). Резьбу на деталях нарезают различными способами: на токарных станках резцом или гребенкой, метчиками, плашками, резьбонарезными головками, дисковыми и групповыми резьбовыми фрезами, одно- и многониточными шлифовальными кругами, накатыванием и др. Широкое применение при изготовлении резьб, особенно в крупносерийном и массовом производстве, получило резьбофрезерование, которое обеспечивает высокую производительность.

Резьбу фрезеруют двумя основными способами — дисковой и групповой фрезой.

1. Фрезерование резьб дисковой фрезой (рис. 35, а). При данном способе ось дисковой фрезы 1 устанавливают на угол подъема винтовой нарезки α относительно оси заготовки 2. Фреза получает главное вращательное движение $v_{\text{ф}}$ и продольную подачу $s_{\text{ф}}$ параллельную оси заготовки, заготовка — вращение (круговую подачу $s_{\text{кр}}$). Фрезерование резьбы обычно производят на полную глубину. С помощью дисковой фрезы можно нарезать резьбы различного профиля и шага и любой длины.

2. Фрезерование коротких резьб групповыми фрезами (35, б, в). Групповая фреза 1 имеет кольцевые канавки. Во время обработки ось фрезы устанавливают параллельно оси заготовки. Фреза получает главное вращательное движение $v_{\text{ф}}$, движение радиальной подачи $s_{\text{р}}$ до полной глубины фрезерования и движение продольной подачи $s_{\text{пр}}$ с шагом нарезаемой резьбы, заготовка — вращение (круговую подачу $s_{\text{кр}}$). За весь цикл обработки заготовка выполняет от $1 \frac{1}{6}$ до $1 \frac{3}{8}$ оборота, а фреза перемещается параллельно оси заготовки на величину немного более

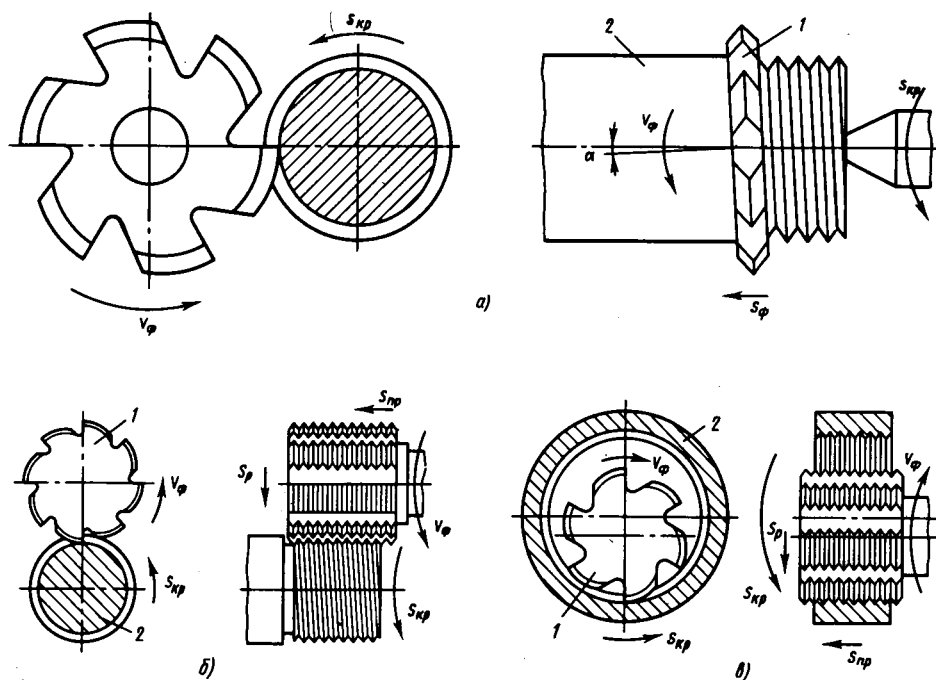


Рис. 35. Способы фрезерования резьб:

а — дисковой фрезой; б, в — групповыми фрезами

одного шага. Это связано с тем, что на подвод, врезание и отвод фрезы, происходящие во время вращения заготовки, затрачивается часть оборота. Групповыми фрезами можно нарезать как наружные (рис. 35, б), так и внутренние (рис. 35, в) резьбы. Так как при фрезеровании резьбы ось фрезы параллельна оси заготовки, а фреза имеет кольцевые витки, то они направлены к виткам нарезаемой резьбы под углом, равным углу подъема резьбы. Это несовпадение витков и резьбы, хотя и незначительно, но искажает профиль резьбы, поэтому метод фрезерования резьбы групповыми фрезами ограничивается заданной точностью резьбы и рекомендуется для изготовления резьб с шагом до 6 мм.

Резьбофрезерный станок мод. 5М5Б62. Назначение — фрезерование коротких наружных и внутренних резьб групповой (гребенчатой) фрезой.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наибольший диаметр фрезеруемой резьбы, мм:	
наружный	100
внутренний	80
Наибольшая длина фрезеруемой резьбы, мм	75
Наибольший шаг (мм) фрезеруемой резьбы, при длине резьбы, мм:	
50	6
75	3

Станок работает по полуавтоматическому циклу. Кинематическая схема станка приведена на рис. 36.

1. **Главное движение** (вращение фрезы 1) осуществляется от электродвигателя 2 ($N=1,5$ кВт, $n=1425$ об/мин). Уравнение кинематического баланса и формула настройки имеют вид

$$n_2 \frac{4}{34} i_n \frac{24}{54} \frac{54}{24} = n_{\phi}, \quad i_n = \frac{n_{\phi}}{168},$$

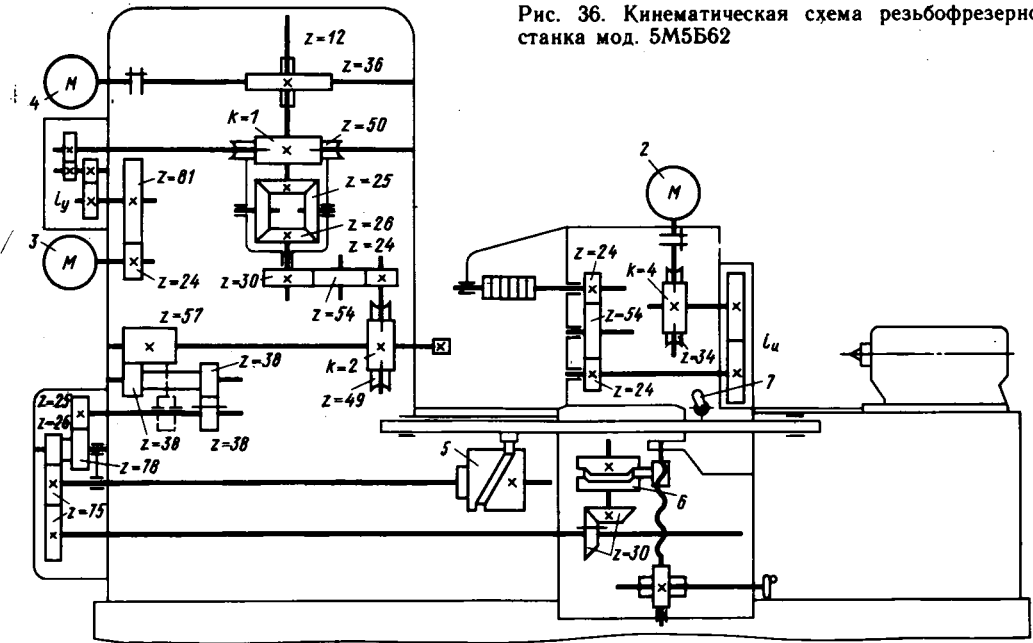
где n_{ϕ} — частота вращения фрезы, об/мин. Гитара главного движения однопарная. Число частот вращения фрезы 9, в пределах от 75 до 375 об/мин.

2. **Движение круговой подачи** (вращение заготовки) осуществляется от электродвигателя 3 ($N=1$ кВт; $n=1425$ об/мин)

$$n_3 \frac{24}{81} i_{II} \frac{1}{50} i_{d1} \frac{30}{54} \frac{54}{24} \frac{2}{49} = \frac{s_{кр}}{\pi D_p};$$

формула настройки $i_y = 0,37 \frac{s_{кр}}{D_p}$, где t_{d1} — передаточное отношение дифференциала; $i_{d1}=2$; $s_{кр}$ — круговая подача заготовки, мм/мин; D_p — средний диаметр фрезеруемой резьбы, мм.

Рис. 36. Кинематическая схема резьбофрезерного станка мод. 5М5Б62



Выразим минутную подачу через подачу на зуб фрезы:

$$S_{\text{кр}} = s_z z_{\text{ф}} n_{\text{ф}},$$

где s_z — подача на зуб фрезы, мм/зуб; $z_{\text{ф}}$ — число зубьев фрезы. Тогда формула настройки примет вид

$$i_{\text{н}} = 0,37 \frac{s_z z_{\text{ф}} n_{\text{ф}}}{D_{\text{р}}}.$$

3. Движение продольной подачи (перемещение фрезы в осевом направлении с шагом нарезаемой резьбы) осуществляется с помощью барабана 5 со сменными кулачками. Кулачок через ролик перемещает тягу, связанную с фрезерной бабкой. Положение бабки относительно тяги можно регулировать рукояткой 7. Настройка цепи подачи на шаг состоит в определении характеристики кулачка. Элементом настройки является подъем L на кулачке барабана 5, который выполняется для всех кулачков на угле поворота барабана $\theta = 110^\circ$:

$$1 \text{ об. шп.} \frac{57}{38} \frac{38}{38} \frac{25}{78} \frac{26}{75} \frac{360^\circ}{0^\circ} L = P,$$

$$L = \frac{11}{6} P,$$

где P — шаг нарезаемой резьбы.

4. Подача на глубину врезания (перемещение фрезы в радиальном направ-

лении на полную глубину фрезерования) осуществляется от кулачка барабана 6. Кулачок имеет постоянный подъем, и настройка производится по конечному перемещению фрезы. Кулачки барабана 6 обеспечивают подвод фрезы ускорению, с рабочей подачей в течение примерно 1/6 оборота заготовки и быстрый отвод после полного нарезания резьбы. За полный цикл обработки барабан 6 делает 1 оборот:

$$n_{\text{ц.шп}} \frac{57}{38} \frac{38}{38} \frac{25}{78} \frac{26}{75} \frac{75}{75} \frac{30}{30} = 1 \text{ об. барабана 6,}$$

где $n_{\text{ц.шп}}$ — число оборотов шпинделя за полный цикл обработки.

5. Ускоренные перемещения (вспомогательные движения) — подвод и отвод фрезы осуществляется от отдельного электродвигателя 4 ($N=1$ кВт, $n=1425$ об/мин). Ускоренные движения накладываются на рабочие (суммируются коническим дифференциалом):

$$n_4 \frac{12}{36} i_{\text{д2}} \frac{30}{54} \frac{54}{24} \frac{2}{49} \frac{57}{38} \frac{38}{38} \frac{25}{78} \frac{26}{75} = n_5; i_{\text{д2}} = 1,$$

где n_5 — частота вращения барабана 5.

§ 4. Анализ кинематики резьбошлифовальных станков

Шлифование резьбы широко применяют в машиностроении при изготовлении резьбонарезного инструмента, резьбовых калибров, накатных роликов, ходовых винтов, червяков, червячных фрез, метчиков и т. д. Большинство из перечисленных деталей подвергается термической обработке, которая обычно приводит к искажению элементов резьбы. Применяют несколько способов шлифования резьб.

1. Шлифование резьб односторонним шлифовальным кругом (рис. 37, а). Инструментом является односторонний шлифовальный круг, профиль которого соответствует профилю одной впадины резьбы. Ось шлифовального круга устанавливают под углом α наклона винтовой нарезки. Во время обработки шлифовальный круг получает главное вращательное движение, а заготовка — медленное вращение (круговая подача) и перемещение вдоль своей оси на величину шага на один оборот (продольная подача). Данным способом можно шлифовать резьбы различного профиля и длины.

2. Шлифование резьб многониточным шлифовальным кругом, имеющим кольцевые канавки. Существует два способа шлифования резьбы многониточным

кругом — продольный и врезной. Оба они значительно производительнее шлифования односторонним кругом, но требуют больше времени на наладку.

Резьбы с шагом до 4 мм на детали из стали выгодно шлифовать многониточным кругом по целой заготовке. Шлифование многониточным кругом производится при горизонтальной установке шлифовального круга, когда оси круга и заготовки параллельны.

Врезное шлифование резьбы (рис. 37, б) применяют для шлифования коротких резьб и деталей с кольцевой нарезкой (резьбовые фрезы). При шлифовании коротких резьб кругу, получающему главное вращательное движение, вначале сообщается поперечная подача на полную или установленную глубину профиля за время около $1/2$ оборота заготовки, далее следует полный оборот заготовки, и рабочий ход заканчивается. При этом заготовка перемещается вдоль своей оси с шагом шлифуемой резьбы. Врезное шлифование совершается приблизительно за $1 \frac{3}{4}$ оборота заготовки. Ширина шлифовального круга должна превышать длину шлифуемой резьбы более чем на два шага.

При параллельном расположении осей круга и заготовки получается некоторая «разбивка» профиля резьбы, но при обычных для нормальных резьб соотношениях размеров эта разбивка ввиду малого угла подъема резьбы незначительна, поэтому ею пренебрегают. По этой причине многониточные круги не используют при шлифовании резьб крупных профилей и с большим углом подъема.

Продольное шлифование резьбы (рис. 37, в) применяют, когда длина резьбы значительно больше ширины многониточного круга. При данном способе шлифовальный круг, установленный на полную глубину профиля резьбы, получает главное вращательное движение, заготовка — вращение и перемещение с шагом шлифуемой резьбы. Первые по движению стола гребни шлифовального круга выполняют предварительное шлифование, последние — окончательное. При увеличении ширины шлифовального круга растет его стойкость, но увеличивается перебег стола. Поэтому ширину круга соизме-

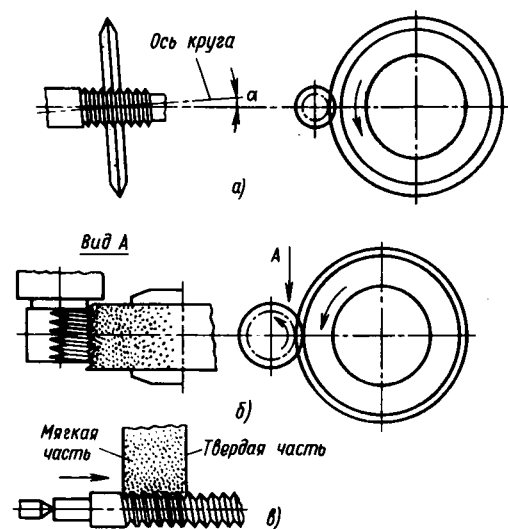


Рис. 37. Способы шлифования резьб:
а — односторонним кругом; б — многониточным кругом короткой резьбы; в — многониточным кругом длинной резьбы

ряют с длиной шлифуемой резьбы: резьбы длиной примерно 200 мм шлифуют кругом шириной 20 мм, а резьбы большей длины — кругом шириной 40 мм.

Универсальный резьбошлифовальный станок мод. 5822М. Назначение — шлифование цилиндрических и конических резьбовых калибров — пробок и калибров — колец, точных винтов и червяков, затылование метчиков, модульных червячных фрез и др. Станок автоматизирован и позволяет производить шлифование одно- и многониточным шлифовальным кругом.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Размеры устанавливаемых деталей, мм, не более:		
диаметр		200
длина		500
Диаметр шлифуемых резьб, мм:		
однониточным кругом		3—150
многониточным кругом		10—120
Шаг шлифуемой метрической резьбы, мм:		
однониточным кругом		0,25—24
многониточным кругом		1—4
Шаг шлифуемой дюймовой резьбы, нитки на 1":		
однониточным кругом		28—3
многониточным кругом		24—6

Кинематическая схема станка приведена на рис. 38.

1. *Главное движение* — вращение шлифовального круга — осуществляется от электродвигателя $M1$ ($N = 5,5$ кВт, $n = 1500$ об/мин):

$$n_{M1} \frac{D_1}{D_2} = n_{ш.к.}$$

Регулирование частот вращения шлифовального круга обеспечивается с помощью быстросменных ступенчатых шкивов.

Сменные шкивы обеспечивают следующие частоты вращения (об/мин) шлифовального круга: при наружном шлифовании — 1440; 1680; 2010; 2380; при внутреннем шлифовании — 11 800; 9000; 6000.

2. *Круговая подача* (вращение детали) осуществляется от электродвигателя постоянного тока $M2$ ($N_n = 0,75$ кВт, $n_n = 2000$ об/мин):

$$n_{эд} \frac{d_1}{d_2} \frac{2}{36} = n_{шп.к.}$$

Благодаря использованию электродвигателя постоянного тока частота

вращения шпинделя регулируется бесступенчато в диапазоне 0,3—45 об/мин.

3. *Винторезное движение* — перемещение стола с обрабатываемой деталью в продольном направлении с шагом шлифуемой резьбы:

$$1 \text{ об. шп. } i_{ш} i_y \left(\frac{1}{6} \right)^n 25,4 = P, \quad i_y = \frac{6P}{i_{ш} 25,4},$$

где $i_{ш}$ — передаточное отношение передаточного механизма.

При шлифовании резьб с шагом P до 8 мм $i_{ш} = \frac{60}{60} = 1$ и $i_y = \frac{6P}{25,4}$. При шлифовании резьб с шагом P более 8 мм движение на ходовой винт передается через звено увеличения шага, тогда

$$i_{ш} = \frac{96}{24} = 4 \text{ и } i_y = \frac{6P}{4 \cdot 25,4}.$$

Настраиваемый шаг можно в узких пределах уменьшать и увеличивать коррекционной линейкой. Для шлифования многозаходных резьб на станке применяют точный делительный патрон, укрепляемый на фланце шпинделя изделия. Резьбы с числом заходов два и четыре шлифуются переключением однозубой муфты в передней бабке без делительного патрона.

4. *Движение затылования и врезного шлифования.* Быстрый подвод и отвод шлифовального круга и затылование осуществляются перемещением шлифовальной бабки по направляющим качения. Уравнение кинематического баланса и формула настройки:

$$1 \text{ об. шп. } \frac{36}{2} \frac{30}{45} i_{д1} i_x \frac{20}{20} \frac{20}{20} \frac{35}{35} \frac{26}{26} = z \text{ об. к.}$$

где $i_{д1} = \frac{1}{2}$ — передаточное отношение

дифференциала; $i_x = \frac{z}{6}$ — передаточное отношение гитары затылования; z — число зубьев затылуемой фрезы.

От кулачка затылования 3 качательное движение передается через рычаг 1, ползушку 2 (ползушка предназначена для настройки величины затылования), рычаг 4 кулаку быстрого отвода 5. Кулак быстрого отвода через корпус 6 гайки поперечной подачи, винт 7 поперечной подачи и гайку компенсирующей подачи 8 связан со шлифовальной бабкой.

Врезное шлифование применяют при шлифовании многониточным шлифовальным кругом коротких резьб. Кине-

матическая настройка заключается в следующем: винторезную цепь настраивают на шаг шлифуемой резьбы, на вал механизма затылования вместо кулачка затылования устанавливают кулачок врезания, на гитару затылования i_x устанавливают сменные зубчатые колеса $\frac{30}{90} \frac{30}{120}$ (на рисунке не показаны).

5. Дифференциальное движение используют при затыловании деталей со спиральными стружечными канавками. Оно обеспечивает дополнительный поворот кулака затылования при перемещении стола с заготовкой в продольном направлении:

$$\frac{l}{P_x} \frac{1}{i_y} i_\varphi \frac{2}{30} i_{д2} i_x \frac{20}{20} \frac{20}{20} \frac{35}{35} \frac{26}{26} = \frac{lz}{T},$$

где P_x — шаг ходового винта, $P_x = (\frac{1}{6} \cdot 25,4)$ мм; l — перемещение стола; T — шаг спиральной стружечной канавки;

$$i_y = \frac{6P}{25,4}; i_{д2} = \frac{1}{2}; i_x = \frac{z}{6}; i_\varphi = \frac{180P}{T}.$$

Привод механизма подачи правящих устройств и компенсирующей подачи шлифовальной бабки осуществляется от электродвигателя МЗ ($N=0,05$ кВт,

$n=1500$ об/мин). Уравнение кинематического баланса

$$n_{МЗ} \frac{18}{50} \frac{1}{56} \frac{28}{30} \frac{K}{50} \frac{19}{25} 1 = s_{п.м.},$$

где $s_{п.м.}$ — подача правящих механизмов; k — число зубьев храпового колеса $z=50$, которое захватывает собачка. Одновременно от винта с шагом $P=1$ через зубчатые колеса $z=20$, $z=64$ и $z=60$ вращение передается на гайку 8 подачи шлифовального круга, т. е. вместе с подачей салазок правящих устройств производится компенсирующая подача шлифовальной бабки. Уравнение кинематического баланса:

$$n_{МЗ} \frac{18}{50} \frac{1}{56} \frac{28}{30} \frac{K}{50} \frac{19}{25} \frac{20}{64} \frac{64}{64} \frac{64}{60} 3 = s_{ш.б.},$$

где $s_{ш.б.}$ — компенсирующая подача шлифовальной бабки.

Перемещения алмазов автоматического правящего устройства осуществляются от электродвигателя М4 ($N=0,05$ кВт, $n=1500$ об/мин) через зубчатые колеса, кулисный механизм и систему рычагов, которые сообщают алмазам рабочее возвратно-качательное движение (дв. ход/мин). Уравнение кинематического баланса

$$n_{М4} \frac{25}{42} i_z \frac{1}{45} \frac{2}{30} = n.$$

Глава 4

Кинематика станков для нарезания цилиндрических зубчатых колес

§ 1. Анализ перемещений инструмента и заготовки при нарезании цилиндрических зубчатых колес

Существуют два основных метода нарезания зубьев зубчатых колес: метод копирования и метод обкатки.

1. Метод копирования. При обработке методом копирования впадина зубчатого колеса образуется режущим инструментом, профиль режущих кромок которого выполнен по форме впадины нарезаемого колеса. К данному методу относятся фрезерование зубьев модульными дисковыми и пальцевыми фреза-

ми, строгание профильными резцами, обработка протяжками и профильными шлифовальными кругами.

Следует отметить, что профиль зуба (кривизна эвольвенты) зубчатого колеса зависит от модуля, угла зацепления и числа зубьев, следовательно, теоретически для обработки каждого зубчатого колеса с определенным числом зубьев и модулем потребуется свой режущий инструмент. Поэтому, например, при обработке дисковыми модульными фрезами зубчатых колес одного модуля, но с различным числом зубьев применяют наборы фрез из 8, 15 или 27 штук. Метод копирования при изготовлении

зубчатых колес имеет ограниченное применение. Более подробно о методе копирования смотри работы [1, 35].

2. Метод обкатки. При обработке зубчатых колес методом обкатки в процессе нарезания зубьев воспроизводится работа какой-либо зубчатой пары (речной, цилиндрической, червячной, конической). При этом одна из деталей зубчатой пары является инструментом, а другая — заготовкой. Формирование боковых поверхностей обрабатываемых зубьев происходит при последовательном изменении положений режущих кромок инструмента в процессе огибания (обкатки) инструмента и заготовки.

Метод обкатки обеспечивает высокую производительность и точность нарезания зубьев, возможность одним инструментом обрабатывать зубчатые колеса одного и того же модуля с любым числом зубьев.

Обработка зубчатых колес долбяками. Долбьяк 1 (рис. 39, а) имеет форму цилиндрического колеса, зубья которого выполнены с углами резания. При нарезании воспроизводится работа пары цилиндрических зубчатых колес (долбяка 1 и заготовки 2). Во время обработки долбьяк получает прямолинейное возвратно-поступательное главное движение и медленное вращение вокруг своей оси. В начале нарезания зубьев при со-

ласованном вращении заготовки и долбяка (движение обкатки) происходит радиальное врезание долбяка (или заготовки) до полной глубины резания. Для получения полностью обработанных зубьев на всей окружности заготовки после окончания радиального врезания долбяка должна сделать полный оборот. Резание происходит только при прямом ходе долбяка, а при обратном холостом ходе шпиндель долбяка или стол несколько отводится, образуя зазор между инструментом и заготовкой для устранения трения задних поверхностей долбяка во впадине нарезаемого колеса. Долбяками можно производить нарезание цилиндрических колес наружного зацепления (рис. 39, б), внутреннего зацепления (рис. 39, в), зубчатых блоков (рис. 39, г), цилиндрических колес с косыми зубьями (рис. 39, д).

Для нарезания цилиндрических колес с косыми зубьями необходимы специальные долбяки. Угол наклона зубьев долбяка должен равняться углу наклона зубьев нарезаемого колеса. Для нарезания колес наружного зацепления направление наклона зубьев долбяка должно быть противоположным, а для нарезания колес внутреннего зацепления — одноименным. Дополнительный к основному вращению поворот долбяка при его вертикальном ходе осуществляется при помощи специальных винтовых

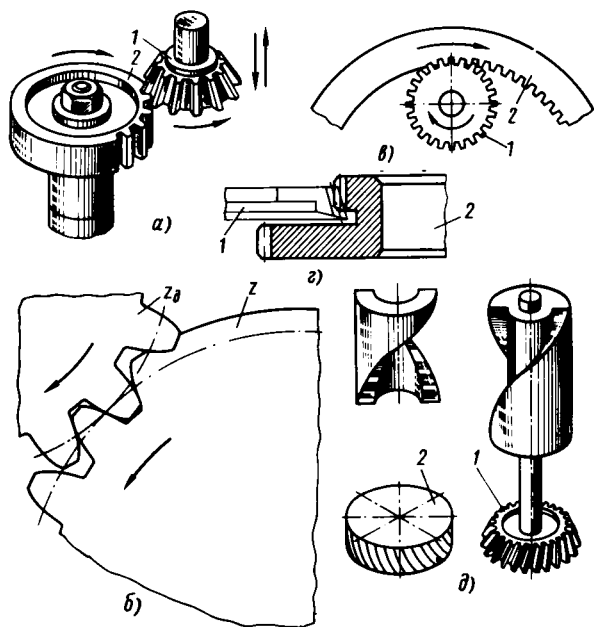


Рис. 39. Схемы нарезания цилиндрических зубчатых колес долбяками

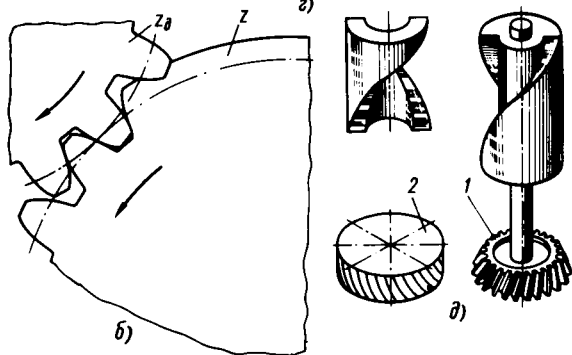


Рис. 40. Схемы нарезания цилиндрических зубчатых колес червячными фрезами

направляющих копиров (рис. 39, д), которые устанавливаются взамен прямолинейных копиров на шпинделе долбяка и во втулке червячного колеса.

Обработка цилиндрических зубчатых колес червячными фрезами. При обработке зубчатых колес червячными фрезами воспроизводятся движения червячной передачи. В этом случае червяк (фреза) является режущим инструментом, а колесо — заготовкой. Во время обработки (рис. 40, а) червячная фреза 1 получает главное вращательное движение и движение вертикальной подачи, а заготовка 2 вращение, согласованное с вращением червячной фрезы (движение обкатки).

При фрезеровании цилиндрических колес с прямыми зубьями (рис. 40, б) между осью червячной фрезы и торцовой плоскостью нарезаемого колеса устанавливают угол γ , равный углу α подъема винтовой нарезки червячной фрезы.

При фрезеровании цилиндрических колес с косыми зубьями ось червячной фрезы устанавливают следующим образом: а) если углы наклона винтовых нарезок червячной фрезы α и нарезаемого колеса β одноименны (оба левые или оба правые), то угол установки фрезы равен $\gamma = \beta - \alpha$ (рис. 40, в); б) если углы наклона винтовых нарезок червячной фрезы α и нарезаемого

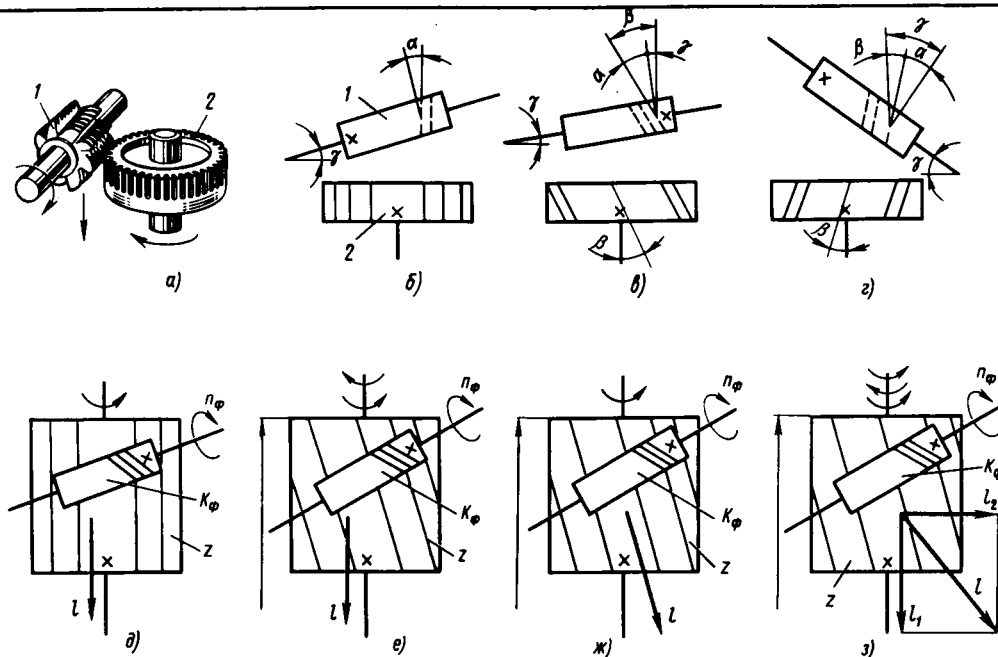
колеса β разноименны, то угол установки оси червячной фрезы γ равен $\gamma = \beta + \alpha$ (рис. 40, г).

Рассмотрим принципиальные схемы нарезания цилиндрических колес с прямыми и косыми зубьями червячными фрезами и проведем анализ движений, которые должны совершать инструмент и заготовка.

Нарезание цилиндрических колес с прямыми зубьями (рис. 40, д). Ось червячной фрезы устанавливают под углом $\gamma = \alpha$. Червячную фрезу устанавливают на полную глубину фрезерования. Во время обработки червячная фреза получает главное вращательное движение (n_ϕ) и движение вертикальной подачи в направлении 1, параллельном оси заготовки, а заготовка — вращение, согласованное с вращением червячной фрезы (движение обкатки). Уравнения кинематического баланса в общем виде будут иметь вид

$$\begin{array}{rcl}
 + n_\phi \text{ об. фрезы} & \dots \dots \dots & n_\phi \frac{k_\phi}{z} \text{ об. заготовки} \\
 l \text{ фрезы} & \dots \dots \dots & 0 \\
 \hline
 n_\phi \left| \begin{array}{l} \text{фрезы} \dots \dots \dots \end{array} \right. & n_\phi \frac{z_1}{z_2} \text{ об. заготовки}
 \end{array}$$

где k_ϕ — число заходов червячной фрезы; z — число зубьев нарезаемого колеса.



Нарезание цилиндрических колес с косыми зубьями может производиться тремя способами (рис. 40, *е, ж, з*), которые отличаются друг от друга направлением перемещения червячной фрезы. Во всех случаях ось червячной фрезы устанавливают под углом $\gamma = \beta \pm \alpha$, а червячную фрезу — на полную глубину фрезерования.

При нарезании цилиндрических колес с косыми зубьями по схеме рис. 40, *е* червячная фреза получает главное вращательное движение и движение вертикальной подачи в направлении l , параллельном оси заготовки. В данном случае направление перемещения червячной фрезы не совпадает с направлением винтовой линии зубьев нарезаемого колеса, поэтому заготовка кроме движения обкатки (вращение как при работе червячной пары) должна получить дополнительный поворот, обеспечивающий совмещение направления зубьев нарезаемого колеса с зубьями червячной фрезы. Этот дополнительный поворот заготовка получает как при вращении винтов в винтовой паре, т. е. если фреза переместится на величину l , то дополнительный поворот заготовки должен составить величину $\frac{l}{T}$, где T — шаг винтовой нарезки нарезаемого колеса.

Уравнения кинематического баланса в данном случае имеют вид

$$\begin{array}{rcl}
 n_{\text{ф}} \text{ об. фрезы} & \dots & n_{\text{ф}} \frac{k_{\text{ф}}}{z} \text{ об. заготовки} \\
 + \\
 l \text{ фрезы} & \dots & \frac{l}{T} \text{ об. заготовки} \\
 \hline
 n_{\text{ф}} \left| \begin{array}{l} \text{фрезы} \end{array} \right. & n_{\text{ф}} \frac{k_{\text{ф}}}{z} \pm \frac{l}{T} \text{ об. заготовки}
 \end{array}$$

Таким образом, заготовка должна получить сумму двух движений [знак плюс при условии, когда винтовые нарезки нарезаемого колеса и червячной фрезы одноименны, знак минус, когда винтовые нарезки разноименны, если движение вертикальной подачи фрезы в направлении l (рис. 40, *е*)].

При нарезании цилиндрических колес с косыми зубьями по схеме рис. 40, *ж* червячная фреза, получая главное вращательное движение, перемещается в направлении l , которое совпадает с направлением зубьев нарезаемого колеса. Такое перемещение червячной фрезы обеспечивает нарезание цилиндриче-

ских колес с косыми зубьями при получении заготовкой только одного движения — вращение как при работе червячной пары (движение обкатки). Уравнения баланса имеют вид

$$\begin{array}{rcl}
 + n_{\text{ф}} \text{ об. фрезы} & \dots & n_{\text{ф}} \frac{k_{\text{ф}}}{z} \text{ об. заготовки} \\
 l \text{ фрезы} & \dots & 0 \\
 \hline
 - n_{\text{ф}} \left| \begin{array}{l} \text{фрезы} \end{array} \right. & n_{\text{ф}} \frac{k_{\text{ф}}}{z} \text{ об. заготовки}
 \end{array}$$

Следовательно, при нарезании цилиндрических колес с косыми зубьями по данной схеме требуется простая настройка станка.

При нарезании цилиндрических колес с косыми зубьями по схеме рис. 40, *з* червячная фреза получает главное вращательное движение и перемещение в направлении l , не совпадающим с направлением оси заготовки и с винтовой нарезкой нарезаемого колеса. Однако это движение можно разложить на два: l_1 — параллельное оси заготовки и l_2 — перпендикулярное ей. Нарезаемое колесо в данном случае будет получать сумму трех движений. Первое — как при работе червячной пары (движение обкатки), второе — как при работе винтовой пары и третье — как при работе реечной пары:

$$\begin{array}{rcl}
 n_{\text{ф}} \text{ об. фрезы} & \dots & n_{\text{ф}} \frac{k_{\text{ф}}}{z} \text{ об. заготовки} \\
 + \\
 l_1 \text{ фрезы} & \dots & \frac{l_1}{T} \text{ об. заготовки} \\
 + l_2 \text{ фрезы} & \dots & \frac{l_2}{\pi m z} \text{ об. заготовки} \\
 \hline
 n_{\text{ф}} \left| \begin{array}{l} \text{фрезы} \end{array} \right. & n_{\text{ф}} \frac{k_{\text{ф}}}{z} \pm \frac{l_1}{T} \pm \frac{l_2}{\pi m z} \text{ об. заготовки}
 \end{array}$$

В данном случае, требуется сложная дифференциальная настройка станка.

Нарезание червячных колес червячными фрезами. При рассмотрении способов нарезания червячных колес следует отметить, что с каждым червячным

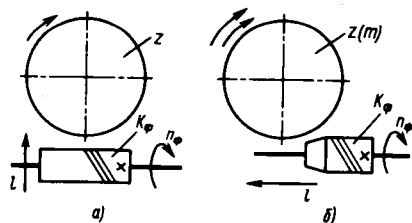


Рис. 41. Схемы нарезания червячных колес

колесом может входить в зацепление только червяк одного определенного размера. Это говорит о том, что червячное колесо необходимо нарезать червячной фрезой, имеющей все основные параметры (модуль, диаметр делительной окружности, число заходов, угол винтовой нарезки) такие же, как у червяка, который будет работать с данным нарезаемым колесом. Необходимая червячная фреза для изготовления червячных колес при равенстве основных параметров с червяком имеет лишь увеличенную высоту зубьев до размеров ножки колеса.

Червячные колеса могут быть нарезаны двумя способами: радиальной подачей фрезы и осевой или тангенциальной подачей фрезы. В обоих случаях ось червячной фрезы устанавливают перпендикулярно оси заготовки и в средней плоскости нарезаемого червячного колеса.

При способе нарезания червячных колес с радиальной подачей фрезы (рис. 41, а) червячная фреза получает главное вращательное движение n_{ϕ} и перемещение в направлении l (радиальная подача), заготовка — вращение, согласованное с вращением червячной фрезы (движение обкатки). Процесс нарезания заканчивается после перемещения фрезы на полную глубину зубьев нарезаемого колеса.

Уравнения кинематического баланса имеют вид

$$\begin{array}{l}
 + \quad n_{\phi} \text{ об. фрезы} \dots \dots n_{\phi} \frac{k_{\phi}}{z} \text{ об. заготовки} \\
 + \quad l \text{ фрезы} \dots \dots \dots 0 \\
 \hline
 \left. \begin{array}{l} n_{\phi} \\ l \end{array} \right| \text{ фрезы} \dots \dots n_{\phi} \frac{k_{\phi}}{z} \text{ об. заготовки}
 \end{array}$$

При способе нарезания червячных колес с осевой или тангенциальной по-

дачей фрезы (рис. 41, б) фреза выполняется с заборным конусом (витки выполнены со срезанными по конусу вершинами зубьев), и при настройке станка ее устанавливают на полную глубину фрезерования. При обработке червячная фреза получает главное вращательное движение n_{ϕ} и движение осевой подачи в направлении l , заготовка при этом должна получать вращение, как при работе червячной пары (движение обкатки), и дополнительный поворот как при работе реечной пары при перемещении червячной фрезы на величину l (дифференциальное движение). Таким образом, мы имеем

$$\begin{array}{l}
 n_{\phi} \text{ об. фрезы} \dots \dots n_{\phi} \frac{k_{\phi}}{z} \text{ об. заготовки} \\
 + \quad l \text{ фрезы} \dots \dots \dots \frac{l}{\pi m z} \text{ об. заготовки} \\
 \hline
 \left. \begin{array}{l} n_{\phi} \\ l \end{array} \right| \text{ фрезы} \quad n_{\phi} \frac{k_{\phi}}{z} \pm \frac{l}{\pi m z} \text{ об. заготовки}
 \end{array}$$

§ 2. Кинематическая настройка зубофрезерных и зубодолбежных станков

Универсальный зубофрезерный станок мод. 5К324А. Назначение — нарезание цилиндрических колес с прямыми и косыми зубьями и червячных колес.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наибольший модуль нарезаемого колеса, мм	8
Наибольший диаметр нарезаемого колеса, мм	500
Наибольшая ширина венца, мм	300
Наибольший угол наклона зубьев, град.	± 60
Наименьшее число нарезаемых зубьев	12

Режущим инструментом является червячная фреза. Нарезание зубчатых колес производится методом обкатки. Станок позволяет работать «попутным» и «встречным» способами зубофрезерования. Червячные колеса нарезаются способом радиального врезания. Цикл работы станка автоматизирован. Все рабочие и вспомогательные движения — быстрый подвод инструмента и заготовки, нарезание зубьев, а также отвод заготовки и инструмента в исходное положение — осуществляются автоматически.

а M_1 выключена. Уравнение кинематического баланса и формула настройки:

$$1 \text{ об. з. } \frac{96}{1} \frac{35}{35} \frac{33}{33} \frac{2}{26} \frac{44}{44} i_y \frac{39}{65} \frac{50}{45} \times \\ \times \frac{45}{45} \frac{1}{24} 10 = s_{\text{в}}; i_y = 0,5 s_{\text{в}}.$$

Осуществление радиальной подачи. Электромагнитная муфта M_1 включена, а M_2 выключена. Уравнение кинематического баланса и формула настройки:

$$1 \text{ об. з. } \frac{96}{1} \frac{35}{35} \frac{33}{33} \frac{2}{26} \frac{44}{44} i_y \frac{39}{65} \frac{45}{50} \times \\ \times \frac{34}{61} \frac{1}{36} 10 = s_{\text{р}}; i_y = 1,6 s_{\text{р}}.$$

Гитара подач однопарная $\Sigma z = 96$. Сменные колеса обеспечивают семь ступеней подачи (мм/об.) в пределах: продольная подача 0,8 — 5,0 и радиальная подача 0,3 — 1,7.

4. *Дифференциальное движение.* Используется при нарезании цилиндрических колес с косыми зубьями — обеспечивает дополнительный поворот заготовки при перемещении фрезы в вертикальном направлении. Уравнение кинематического баланса

$$\frac{l}{10} \frac{24}{1} \frac{33}{22} i_{\varphi} \frac{27}{27} \frac{1}{45} i_{\text{д2}} \frac{e}{f} i_x \frac{33}{33} \times \\ \times \frac{35}{35} \frac{1}{96} = \frac{l}{T},$$

где l — перемещение фрезы в вертикальном направлении; $i_{\text{д2}} = 2$ — передаточное отношение конического дифференциала, T — шаг винтовой нарезки колеса. Подставив значения

$$\frac{e}{f} = \frac{54}{54}, i_x = \frac{24k_{\varphi}}{z}, T = \frac{\pi m z}{\sin \beta} e, \\ \pi = 3,14159,$$

получим формулу настройки

$$i_{\varphi} = \frac{7,95775 \sin \beta}{m_{\text{нк}} k_{\varphi}},$$

где β — угол наклона линии зуба нарезаемого колеса; $m_{\text{н}}$ — модуль нормальный, мм.

Гитары обкатки и дифференциальная двухпарные.

5. *Движение ускоренных перемещений каретки суппорта и стола* осуществляется от электродвигателя $M2$ ($n =$

$= 1440$ об/мин). Уравнения кинематического баланса имеют вид:

а) в радиальном направлении

$$n_{M2} \frac{25}{25} \frac{36}{60} \frac{45}{50} \frac{34}{61} \frac{1}{36} 10 = s_{\text{р. п}};$$

б) каретки суппорта в вертикальном направлении

$$n_{M2} \frac{25}{25} \frac{36}{60} \frac{50}{45} \frac{45}{45} \frac{1}{24} 10 = s_{\text{в. в}}.$$

6. *Периодическое перемещение фрезы в осевом направлении* осуществляется от электродвигателя M_3 .

$$n_{M3} \frac{1}{20} \frac{1}{62} P = s_0,$$

где P — шаг винтовой нарезки.

Зубодолбежный станок мод. 5140. Назначение — нарезание цилиндрических колес с прямыми и косыми зубьями наружного и внутреннего зацепления.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наибольший модуль нарезаемого колеса, мм	8
Наибольший наружный диаметр, мм	500
Наибольшая ширина венца, мм	100
Наибольший угол спирали, град	± 35
Наименьший диаметр устанавливаемого долбяка, мм	100

Обработка зубчатых колес производится долбяком по методу обкатки. Станок может работать в наладочном и в полуавтоматическом режиме. Предусмотрена возможность обработки зубчатых колес в один, два и три рабочих хода. Обработка на станке производится по автоматическому циклу (со сменой режимов обработки), включая подвод и отвод детали к инструменту.

Кинематическая схема станка приведена на рис. 43.

1. *Главное движение* (возвратно-поступательное движение долбяка) осуществляется от электродвигателя $M1$ ($N = 3,7$ кВт, $n = 940/1420$ об/мин) через шкивы $\varnothing 100$ и $\varnothing 160$ мм, коробку скоростей, шкивы $\varnothing 180$ и $\varnothing 355$ мм на центральный вал привода штосселя. На конце этого вала имеется ползушка, несущая камень кулисы. При ее эксцентричной установке регулируется ход штосселя (шпинделя долбяка) при долблении. Коробка скоростей имеет двухскоростной электродвигатель для

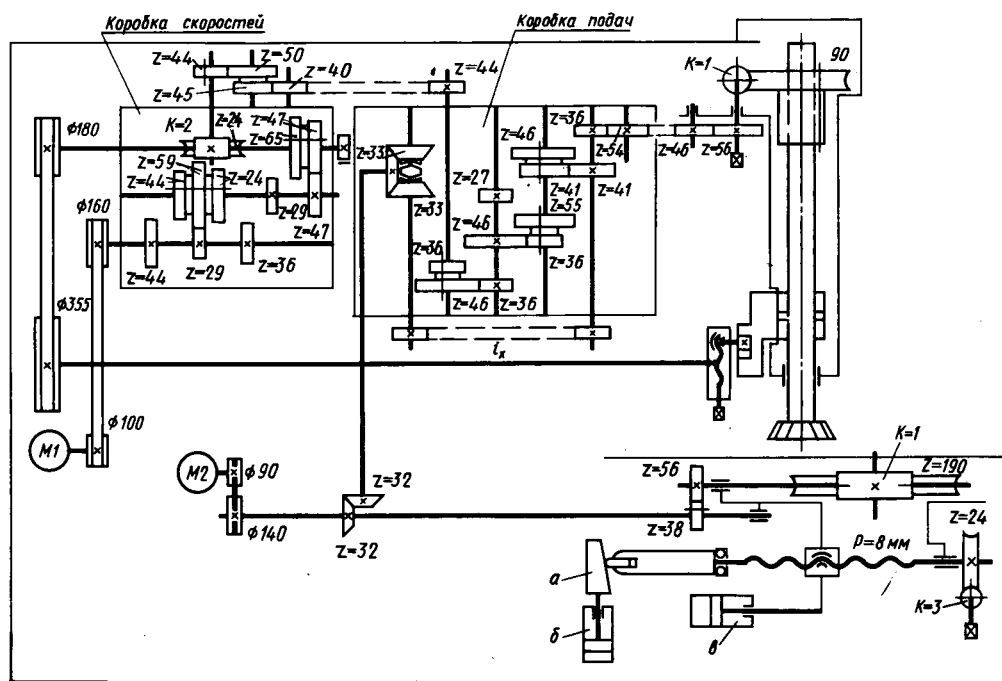


Рис. 43. Кинематическая схема зубодолбежного станка мод. 5140

чистой ($n = 1420$ об/мин) и черновой ($n = 940$ об/мин) обработки и два блока зубчатых колес. Уравнение кинематического баланса

$$n_{M1} \frac{100}{160} i_{к.с} \frac{180}{355} = n \frac{\text{дв. ход}}{\text{мин.}} \text{ долб.},$$

где $i_{к.с}$ — передаточное отношение коробки скоростей.

Коробка скоростей обеспечивает шесть значений двойных ходов в минуту штокселя при чистой и шесть при черновой обработке, т. е. 12 ступеней в пределах от 65 до 450 дв. ход/мин. Числа двойных ходов инструмента во время цикла обработки деталей изменяют переключением электродвигателя главного движения.

2. Движение обкатки (деления) обеспечивает согласованное вращение долбяка и заготовки. Уравнение кинематического баланса и формула настройки

$$1 \text{ об. долб.} \frac{90}{1} \frac{56}{46} \frac{46}{54} \frac{54}{36} i_x \frac{33}{33} \frac{32}{32} \times \\ \times \frac{38}{56} \frac{1}{190} = \frac{z_d}{z},$$

где z_d — число зубьев долбяка, z — число зубьев нарезаемого колеса. Гитара обкатки (деления) двухпарная.

3. Движение круговой подачи — поворот долбяка на его двойной ход. Изменение величины круговой подачи (скорости обкатки инструмента и заготовки) осуществляется с помощью коробки подач с гидравлическим переключением подачи по циклу обработки изделия, на которую движение подается от вала коробки скоростей:

$$1 \text{ дв. ход. долб.} \frac{355}{180} \frac{2}{24} \frac{44}{50} \frac{45}{40} \frac{40}{41} \times \\ \times i_{к.п} \frac{36}{54} \frac{54}{46} \frac{46}{56} \frac{1}{90} = \frac{s_{кр}}{\pi D_d},$$

где $i_{к.п}$ — передаточное отношение коробки подач; $s_{кр}$ — круговая подача, мм/дв. ход долбяка; D_d — диаметр начальной окружности долбяка.

Установку величины круговой подачи производят переключателями на пульте станка. Переключение с черновой подачи на чистовую происходит перед последним проходом автоматически по циклу работы станка. При работе однопроходным циклом и при работе в на-

ладочном режиме будет осуществляться круговая подача, установленная переключателями чистовой подачи.

Коробка подач обеспечивает восемь ступеней подач в пределах от 0,14 до 0,75 мм/дв. ход. долбяка.

4. *Движение радиальной подачи* обеспечивает перемещение заготовки в радиальном направлении до полной глубины нарезания. Радиальная подача осуществляется от клиновой ползушки *а*, которая получает перемещение от гидроцилиндра *б*. Величину радиальной подачи устанавливают дросселем. Радиальная подача лежит в пределах от 0,025 до 0,1 мм/дв. ход. Ускоренный подвод стола с заготовкой осуществляется гидроцилиндром *в*.

Установка на межцентровое расстояние на полную глубину врезания производится столом с заготовкой, который перемещается по станине на плоских горизонтальных направляющих.

5. *Движение ускоренного вращения детали* осуществляется от электродвигателя *М2* ($N=0,8$ кВт, $n=1350$ об/мин) При включении быстрого вращения заготовки муфта *М* должна быть установлена в среднее (нейтральное) положение:

$$n_{M2} \frac{90}{140} \frac{38}{56} \frac{1}{190} = n_{x, x},$$

где $n_{x, x}$ — частота вращения детали при холостом ходе.

Для фиксации полного оборота стола с деталью в автоматическом цикле при черновых и чистовых рабочих ходах на станке имеется автоматический счетчик, который включается после врезания инструмента. При радиальной подаче заготовки на глубину врезания счетчик отключен. После окончания цикла обработки подается сигнал на выключение станка.

§ 3. Анализ перемещений инструмента и заготовки при отделке зубьев цилиндрических зубчатых колес

Для повышения точности и чистоты боковых поверхностей зубьев колес применяют следующие способы отделочной обработки: для термически необработанных (сырых) колес — обкатка, ше-

вингование, приработка; для термически обработанных (закаленных) колес: обкатка, шлифование, притирка, приработка, зубохонингование, полирование.

Шлифование зубьев является наиболее распространенным способом отделочной обработки точных закаленных зубчатых колес. При этом способе отделки можно получить 4—6-ю степень точности зубьев с высокой чистотой обработанной поверхности. Шлифование зубьев производят по двум методам: копирования и обкатки.

При шлифовании по методу копирования применяют фасонные шлифовальные круги с профилем, соответствующим профилю впадины между зубьями колеса (рис. 44, *а*). Шлифовальному кругу сообщается главное вращательное движение и возвратно-поступательное вдоль направления зуба шлифуемого колеса. Подачу на глубину шлифования осуществляют периодически за каждый двойной ход шлифовального круга, при этом заготовка остается неподвижной. После шлифования каждой впадины и выхода из нее шлифовального круга производится делительный поворот заготовки на заданный угол. Перед шлифованием следующей впадины выполняют механическую правку шлифовального круга алмазом по шаблону.

Шлифование по методу обкатки производится несколькими способами.

Шлифование одним дисковым шлифовальным кругом, рабочие поверхности которого при возвратно-поступательном движении образуют плоскости, соответствующие поверхности зубьев исходного контура рейки, показано на рис. 44, *б*.

Во время обработки шлифовальный круг получает главное вращательное и возвратно-поступательное движение вдоль зуба колеса, а заготовка вращается вокруг своей оси в одном направлении и одновременно прямолинейно перемещается. Поступательное перемещение заготовки согласовано с вращением так, что заготовка как бы катится по воображаемой рейке. После окончания обработки впадины (рабочий ход) заготовка отводится от шлифовального круга и получает перемещение в обратном направлении в исходное положение (холостой ход). Во время холостого

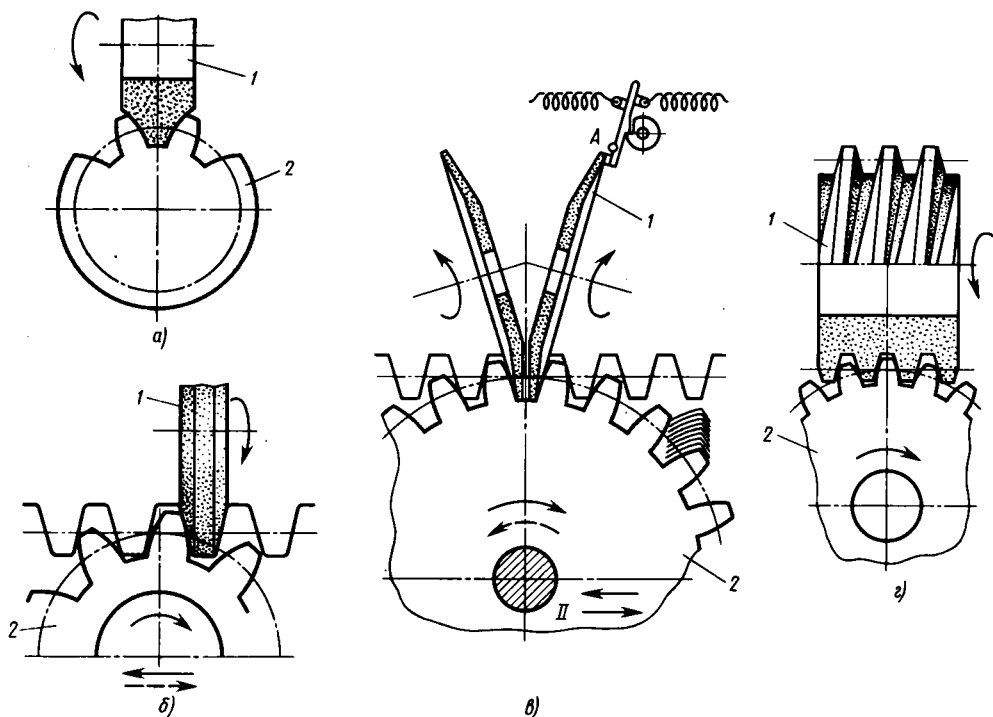


Рис. 44. Способы шлифования цилиндрических зубчатых колес:

1 — круг; 2 — колесо

хода совершается делительный поворот заготовки. Далее начинается новый цикл шлифования следующей впадины после подвода заготовки к шлифовальному кругу. Во время холостого хода производится правка шлифовального круга.

Обработка двумя дисковыми шлифовальными кругами, образующими зуб производящей рейки, показана на рис. 44, в. Во время обработки шлифовальные круги получают главное вращательное и возвратно-поступательное движение вдоль зуба шлифуемого колеса, заготовка — вращение и перемещение как при работе реечной пары. После окончания рабочего хода заготовка отводится от шлифовальных кругов и перемещается обратно в исходное положение без вращения. Далее заготовка подводится к шлифовальным кругам, и цикл обработки повторяется. Шлифовальные круги правят автоматически во время холостого хода.

Обработка шлифовальным кругом, выполненным в виде червяка [шлифо-

вание зубьев абразивным червяком (рис. 44, г)] — этот способ является наиболее производительным из способов зубошлифования, так как обработка производится непрерывно.

Шлифовальные круги выполняются одно- или двухзаходными, диаметром 300—400 мм. Во время обработки шлифовальный круг получает главное вращательное движение и движение радиальной подачи. Обрабатываемое колесо вращается согласованно с вращением червячного шлифовального круга (движение обкатки) и происходит медленное движение вертикальной подачи.

Анализ кинематики зубошлифовального станка мод. 5В833. Назначение — шлифование зубьев цилиндрических прямозубых и косозубых колес.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Модуль шлифуемого колеса, мм 0,5—4
Наибольший наружный диаметр, мм . . . 320
Наибольшая ширина венца, мм 150
Наибольший угол наклона зубьев, град. ± 45

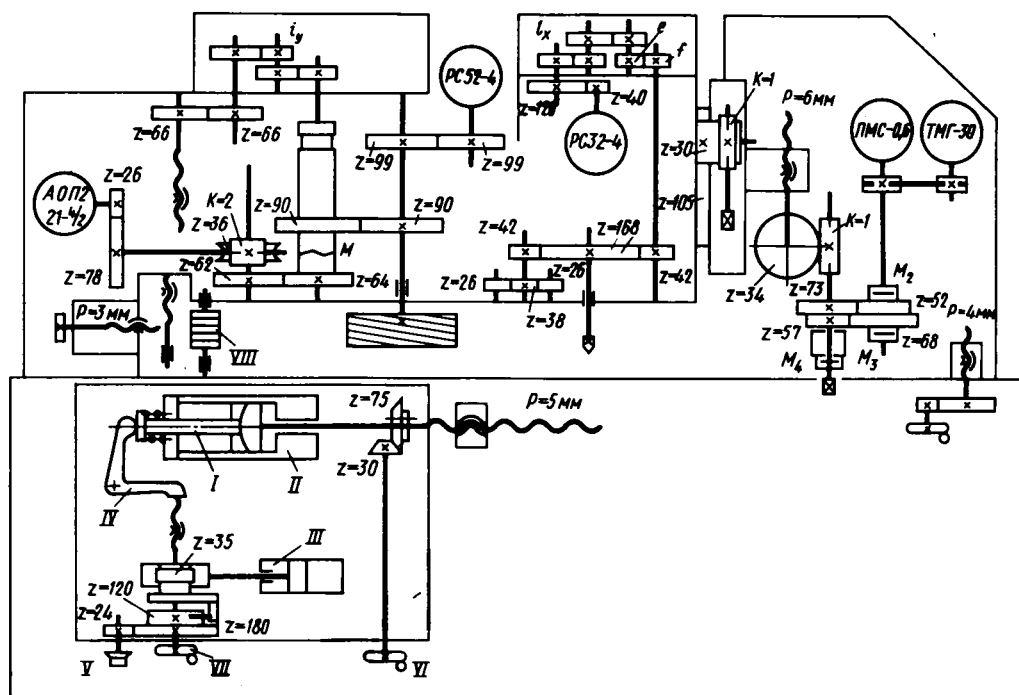


Рис. 45. Кинематическая схема зубошлифовального станка мод. 5B833

Шлифование производится абразивным червяком методом обкатки при непрерывном делении. Кинематическая схема станка приведена на рис. 45.

1. *Главное движение* — вращение шлифовального круга. Шлифовальный круг получает постоянную частоту вращения от синхронного реактивного электродвигателя РС52-4 ($N=4$ кВт, $n=1500$ об/мин). Во время шлифования зубчатого колеса муфта M_1 разомкнута и шестерни $z=90$ и $z=90$ не зацепляются.

$$n_{эл} \frac{99}{99} = n_{ш.к.}$$

где $n_{ш.к.}$ — частота вращения шлифовального круга.

2. *Движение обкатки (деления)* обеспечивает согласование вращения абразивного червяка и шлифуемой заготовки. Характерной особенностью станка является наличие в цепи обкатки (деления) электрической синхронной связи, осуществляемой двумя синхронными электродвигателями. Электродвигатель РС52-4 приводит

во вращение шлифовальный круг, а электродвигатель РС32-4 ($N=1,1$ кВт, $n=1500$ об/мин) — шлифуемую заготовку. Так как оба электродвигателя имеют одинаковую частоту вращения ($n=1500$ об/мин), то уравнение баланса кинематической цепи обкатки (деления):

$$1 \text{ об. ш. к. } \frac{99}{99} \frac{40}{120} i_x \frac{e}{f} \frac{42}{168} = \frac{k_{ш}}{z},$$

где $k_{ш}=1$ — число заходов абразивного червяка; z — число зубьев шлифуемого колеса.

При $z=12-32$ устанавливают сменные колеса перебора

$$\frac{f}{e} = \frac{60}{60}, \text{ и тогда } i_x = \frac{12}{z}.$$

$$\text{При } z=24-200 \frac{f}{e} = \frac{80}{40}; i_x = \frac{24}{z}.$$

$$\text{При } z=36-200 \frac{f}{e} = \frac{90}{30}; i_x = \frac{36}{z}.$$

3. *Движение вертикальной подачи* обеспечивает возвратно-поступатель-

ное движение суппорта изделия во время шлифования. Привод вертикальной подачи бесступенчатый с муфтой скольжения ПМС-0,6 и с регулированием тахогенератором ТМГ-30. Исполнительным звеном перемещения каретки с суппортом является пара винт—гайка. Реверс движения каретки с суппортом осуществляется самим приводом при подаче команды от регулируемых упоров. Для увеличения диапазона регулирования величины подачи между приводом ПМС-0,6 и парой винт—гайка имеется двухступенчатый зубчатый перебор, переключаемый двумя электромагнитными муфтами с передаточными отношениями

$i_1 = \frac{52}{73}$ и $i_2 = \frac{68}{57}$. Уравнение баланса кинематической цепи

$$n_{\text{ПМС}} i_{\text{П}} \frac{1}{34} 6 = s_{\text{в}}.$$

4. Движение радиальной подачи осуществляет радиальную подачу бабки шлифовального круга на деталь за каждый ход детали и отвод бабки после окончания шлифования.

Цепь автоматической радиальной подачи состоит из храпового механизма ($z=120$) и гидравлической следящей системы. Качательное движение собачке храпового механизма сообщается гидроцилиндром III через рейку, зубчатое колесо $z=35$. Далее движение передается на ходовой винт ($P=1,5$ мм), который получает поступательное перемещение и поворачивает рычаг IV. Рычаг IV перемещает следящий гидрораспределитель I, в результате чего поршень II перемещает шлифовальную бабку на величину радиальной подачи, устанавливаемую лимбом V. Ручное перемещение при наладке осуществляется маховиком VI через коническую зубчатую пару $\frac{30}{75}$ и ходовой винт с шагом $P=5$ мм. Маховик VII служит для установки величины пере-

мещения шлифовальной бабки при шлифовании заготовки.

5. Движение при правке шлифовального круга. Точность обработки во многом зависит от того, насколько точно произведена правка профиля витка абразивного червяка. В станке предусмотрен специальный механизм правки с ручной подачей правящего инструмента на абразивный червяк.

Правку абразивного червяка производят стальным многониточным накатником VIII, который устанавливают в специальном приспособлении на салазках механизма правки или алмазными резцами. Накатник приводится во вращение абразивным червяком и перемещается возвратно-поступательно вдоль оси шпинделя (строго согласованно с вращением абразивного червяка).

Рассмотрим главное вращательное движение шлифовального круга при правке. Во время правки шлифовального круга муфта M_1 включена и зубчатые колеса $z=90$ и $z=90$ находятся в зацеплении. При этом шлифовальный круг получает вращение от электродвигателя АОП2 ($N=0,7/0,9$ кВт, $n=1400/2720$ об/мин). Уравнение кинематического баланса

$$n_{\text{эд}} \frac{26}{78} \frac{2}{36} \frac{62}{64} \frac{90}{90} = n_{\text{ш.к.}}$$

При $n_{\text{эд}}=1400$ об/мин — рабочий ход, $n_{\text{ш.к.}}=25$ об/мин. При $n_{\text{эд}}=2720$ об/мин — холостой ход, $n_{\text{ш.к.}}=49$ об/мин.

Движение подачи накатника обеспечивает согласование перемещения накатника с вращением шлифовального круга. Уравнение кинематического баланса и формула настройки

$$1 \text{ об. ш. к. } \frac{90}{90} i_{\text{у}} \frac{66}{66} 6,283 = m_{\text{н}} \pi; i_{\text{у}} = \frac{m_{\text{н}}}{2},$$

где $m_{\text{н}}$ — модуль нормальный шлифовального зубчатого колеса.

**§ 1. Анализ перемещений
инструмента и заготовки
при нарезании конических
зубчатых колес с прямыми
зубьями**

Существуют два основных метода изготовления конических зубчатых колес: копирования и обкатки.

При методе копирования обработку ведут дисковыми или пальцевыми модульными фрезами, строганием по шаблону с помощью одного или двух резцов, протягиванием и др.

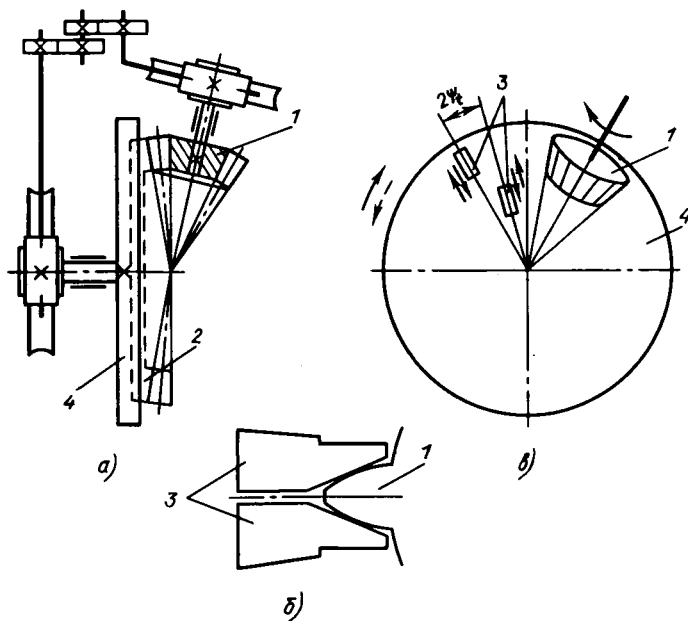
В основе всех применяемых способов обработки конических зубчатых колес по методу обкатки лежит понятие о производящем колесе, по которому в процессе обработки обкатывается заготовка. На существующих станках производящее колесо является воображаемым, и зубья воспроизводятся в пространстве движущимися режущими кромками инструментов. В качестве инструментов применяют резцы, дисковые фрезы, резцовые головки и др.

Обработка конических зубчатых колес с прямыми зубьями двумя резцами, образующими впадину плоского произ-

водящего колеса. Если у одного из пары зацепляющихся конических колес угол при вершине делительного конуса $2\delta_1$ приравнять 180° , получим зацепление второго колеса с плоским прямобочным профилем зубьев. Это условие и было использовано в зубострогальных станках (рис. 46, а), в которых заготовка 1 зацепляется с плоским производящим колесом 2. Однако на станке плоское колесо 2 заменено двумя резцами 3 (рис. 46, б), образующими одну впадину. Поэтому плоское колесо 2 называется производящим воображаемым колесом.

Во время обработки два резца, образующие впадину производящего колеса, получают главное прямолинейное возвратно-поступательное движение в направлении, параллельном образующей конуса впадин нарезаемого колеса 1, причем прямолинейные траектории вершин резцов 3 (рис. 46, в) проходят через вершину начального конуса нарезаемого колеса. Для обеспечения этого условия суппорты с резцами, смонтированные на планшайбе люльки 4, устанавливают между собой под углом 2Ψ . Люлька 4 вместе с резцами 3

Рис. 46. Схема нарезания конических зубчатых колес двумя резцами, образующими впадину плоского производящего колеса



вращается то в одну, то в другую сторону, воспроизводя движение производящего колеса 2. Во время рабочего хода заготовка 1 получает вращение, согласованное с вращением производящего колеса 2 (движение обкатки). При этом образуется октоидальный профиль боковых поверхностей нарезаемых зубьев, практически мало отличающийся от эвольвентного. После окончания рабочего хода заготовку отводят от люльки, производят реверс и люлька получает быстрое вращение в обратном направлении. Во время холостого хода совершается делительный поворот заготовки. Далее заготовку подводят к люлке, и цикл обработки следующего зуба повторяется. Угол качания люльки выбирают таким, чтобы резцы полностью обкатали (обработали) нарезаемые зубья по всей высоте профиля.

Для настройки цепи обкатки необходимо знать число зубьев производящего колеса.

На рис. 47, а приведена схема зацепления заготовки (z_1) с плоским производящим колесом (z_c), у которого половина угла при вершине начального конуса $\delta_c = 90^\circ$. Известно, что отношение чисел зубьев двух сопряженных конических колес пропорционально отношению синусов половин углов начальных конусов. Тогда можно записать

$$\frac{z_c}{z_1} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \delta_1}; \quad z_c = \frac{z_1}{\sin \delta_c},$$

где z_1 — число зубьев нарезаемого колеса; z_c — число зубьев производящего колеса; δ_1 — половина угла делительного конуса заготовки.

Схема зацепления заготовки (z_1) с плосковершинным производящим колесом (z'_c) приведена на рис. 47, б. Плос-

ковершинное производящее колесо отличается от плоского тем, что половина угла при вершине начального конуса составляет $\delta'_c = 90^\circ - \theta_f$, где θ_f — угол ножки зуба нарезаемого колеса.

Следовательно:

$$\frac{z'_c}{z_1} = \frac{\sin (90^\circ - \theta_f)}{\sin \delta_1}, \quad \text{или} \quad z'_c = \frac{z_1 \cos \theta_f}{\sin \delta_1}.$$

Изготовить резцовую головку с направлением движения резцов, постоянно перпендикулярным к оси производящего плосковершинного колеса, значительно проще, нежели с направлением движения, угол которого по отношению к оси производящего колеса (при плоском производящем колесе) должен измениться в зависимости от размеров зубьев нарезаемого колеса. Однако следует отметить, что угол ножки зуба нарезаемого колеса мал и $\cos \theta_f$ близок к единице (обычно $\cos \theta_f > 0,998$), то вполне допустимо рассматривать плосковершинное производящее колесо как плоское и определять число зубьев производящего колеса по формуле для определения z_c . Ошибка в результате этого допущения очень мала и не выходит за допустимые пределы неточностей изготовления колес.

Обработка прямозубых конических колес дисковыми фрезами (метод обкатки). Данный способ основан на том, что обработку производят двумя дисковыми фрезами I (рис. 48, а), которые образуют зуб плоского производящего колеса. Фрезы имеют резцы 2, показанные на рис. 48, б. Во время обработки фрезы I, II получают главное вращательное движение. Люлька с вращающимися фрезами и заготовка получают согласованное вращение — движение обкатки. После обработки одной впадины заготовку отводят от фрез, люлька получает ускоренное вращение в обратном направлении, а заготовка получает делительный поворот для ввода фрез в следующую впадину нарезаемого колеса.

При обработке обе фрезы получают вращение с одинаковой частотой, причем при вращении фрез резцы одной из них свободно проходят в промежутки между резцами другой фрезы (рис. 48, в).

Нарезание рассмотренным способом осуществляется без подачи фрез вдоль зуба, поэтому дно нарезаемой впадины

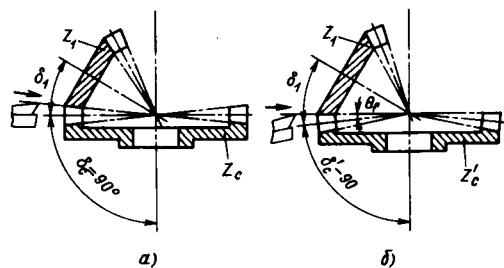


Рис. 47. Схемы зацепления заготовки с плоскими производящими колесами

получает вогнутую поверхность с радиусом R_n (рис. 48, з). Следует отметить, что рабочий профиль зубьев остается таким же, как при строгании, поэтому фрезерованные зубчатые колеса взаимозаменяемы и могут сцепляться с зубчатыми колесами, нарезанными на зубострогальных станках. Прочность и качество зацепления не ухудшаются. При обработке резцами, режущие кромки которых лежат в плоскости, перпендикулярной оси вращения (рис. 48, б, угол $\gamma = 0$), зубья будут иметь обычную прямолинейную форму. При обработке резцами с углом поднутрения γ (рис. 48, б) при вращении фрезы режущие кромки образуют коническую поверхность и нарезаемые зубья приобретают бочкообразную форму. При этом оси фрез добавочно поворачивают на угол γ . Способ фрезерования конических прямозубых колес в 3—5 раз производительнее, чем зубострогание, так как вместо двух резцов применяют многолезвийные фрезы.

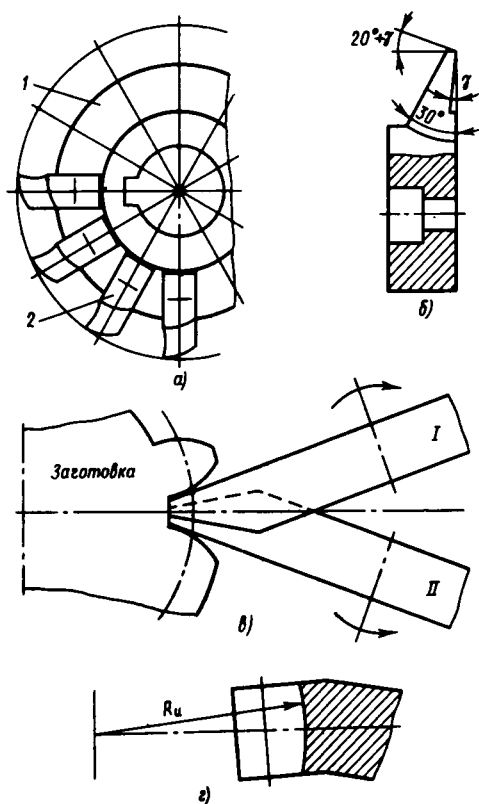


Рис. 48. Схема нарезания конических зубчатых колес двумя дисковыми фрезами, образующими зуб плоского производящего колеса

§ 2. Кинематическая настройка станков для нарезания конических колес с прямыми зубьями

Зубострогальный полуавтомат мод. 5236П. Назначение — нарезание конических зубчатых колес с прямыми зубьями повышенной точности.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Нарезаемый модуль, мм	0,5—2,5
Наибольший диаметр делительной окружности, мм	125
Наибольшая ширина зубчатого венца	20

Кинематическая схема станка приведена на рис. 49.

Станок работает методом обкатки. Обработку производят двумя резцами, которые образуют исходный контур впадины производящего колеса. Станок работает с периодическим делением. Цикл обработки одного зуба включает в себя рабочий и холостой ход. При рабочем ходе заготовка и обкатная люлька вращаются согласованно в одну сторону, а стол с заготовкой подводят в рабочее положение. После окончания обкатки профиля зуба стол с заготовкой быстро отводят назад, а люлька на ускоренном ходу начинает вращаться в обратном направлении, причем заготовка продолжает вращаться в ту же сторону, что и при рабочем ходе. К концу обратного (холостого) хода заготовка успевает повернуться на z_i зубьев. Далее повторяется цикл обработки следующего зуба (не обязательно соседнего). Цикл обработки повторяют до тех пор, пока не произойдет нарезание всех зубьев на заготовке.

1. **Главное движение** (возвратно-поступательное движение резцов) осуществляется от электродвигателя $M1$ ($N=0,6$ кВт, $n=910$ об/мин). Уравнение кинематического баланса и формула настройки:

$$n_{M1} \frac{80}{80} \frac{30}{30} \frac{30}{54} i_n \frac{37}{53} = n; \quad i_n = \frac{n}{365};$$

$$n = \frac{1000v}{2l},$$

где n — число двойных ходов резцов в минуту; v — скорость резания, м/мин; l — длина хода резцов, мм. Гитара главного движения однопарная $\Sigma z =$

$z=20$ во время рабочего хода зацепляется с наружным венцом $z_n=120$ реверсивного колеса и после того, как реверсивное колесо совершит пять полных оборотов, перемещается вдоль зуба под действием кулачка PB_2 и переходит в зацепление с составным участком $z=120$ (96). Затем по полушестерне $z=20$ (10) ведущее колесо $z=20$ входит в зацепление с внутренним венцом $z=80$ (64) и, наконец, перемещается вдоль зуба, с его целым участком $z_n=80$.

После того как реверсивное колесо сделает опять пять оборотов в обратную сторону (холостой ход), ведущее колесо $z=20$ переместится вдоль зуба на составной участок, по полушестерне $z=20$ (10) — на его наружный венец $z=120$ (96). Затем колесо $z=20$ перемещается вдоль зуба на наружный венец целого участка реверсивного колеса, и цикл начинается снова.

Таким образом, реверсивное колесо за цикл в одну и в другую сторону при зацеплении с колесом $z=20$ совершает по пять полных оборотов и неполный шестой оборот при зацеплении с подковообразным колесом.

Количество оборотов за один цикл работы станка ведущего колеса $z=20$ реверсивного механизма определяют по формуле

$$n_{z=20} = \frac{z_n}{20} 5 + \frac{z_n}{20} 5 + \frac{96 + 64 + 2 \cdot 10}{20} + 1 = 60 \text{ об.}$$

Число оборотов распределительного вала за один цикл работы станка

$$n_{PB_1} = 60 z=20 \frac{61}{62} \frac{62}{61} \frac{20}{20} \frac{20}{20} \frac{50}{50} \frac{50}{50} \frac{1}{60} = 1 \text{ об.}$$

2. Движение деления обеспечивает делительный поворот заготовки за цикл работы станка на z_i зубцов. Цепь деления согласует вращение распределительного вала PB_1 с заготовкой. Уравнение кинематического баланса и формула настройки:

$$1 \text{ об. } PB_1 \frac{60}{1} \frac{50}{50} \frac{50}{50} \frac{20}{20} \frac{20}{20} \frac{20}{20} \frac{23}{23} \times \times \frac{25}{25} i_x \frac{1}{180} = \frac{z_i}{z}; i_x = \frac{3z_i}{z},$$

где z_i — число зубьев, на которое поворачивается нарезаемое колесо во время

делительного процесса. Число z_i не должно быть кратным и иметь общих множителей с числом зубьев нарезаемого колеса z .

3. Движение обкатки согласует вращение заготовки и люльки (плоского колеса). Уравнение кинематического баланса

$$1 \text{ об. заг } \frac{180}{1} \frac{1}{i_x} \frac{25}{25} \frac{23}{23} \frac{20}{20} \frac{61}{62} \frac{62}{61} \times \times \frac{20}{120} \frac{120}{24} i_\varphi \frac{1}{175} = \frac{z}{z_c}.$$

Подставляя $i_x = \frac{3z_i}{z}$ и $z_c = \frac{z}{\sin \delta_1}$, получим формулу надстройки $i_\varphi = \frac{3,5z_i \sin \delta_1}{z}$.

Число z_i определяют по формуле $z_i = \frac{0z_c}{210} + 2$, где 0 — полный угол качания люльки при обработке зубчатого колеса из целой заготовки:

$$\theta = \theta' + 0,5\theta_z = \arccos\left(\frac{\cos \delta_a}{\cos \delta_f}\right) + 0,5\theta_z,$$

где δ_a — угол наружного конуса; δ_f — угол внутреннего конуса; θ_z — угол качания люльки при обработке профиля:

$$\theta_z = \frac{1200}{z_c}, \quad z_c = \frac{z}{\sin \delta_1}.$$

При угле делительного конуса нарезаемого колеса $\delta_1 > 70^\circ$ $\theta_k = \theta'_k + 0,6\theta_z$.

4. Движение подачи условно задается временем рабочего хода t_p в секундах. Движение подачи осуществляется от электродвигателя постоянного тока M_2 в сочетании с установкой ПМУ. Двигатель имеет бесступенчатое регулирование частоты вращения от 300 до 3000 об/мин, которое определяет рабочее время цикла. Кинематическая цепь подачи согласует вращение электродвигателя с распределительным валом PB_1 :

$$t_p \frac{n_{эд}}{60} \frac{140}{188} \frac{20}{65} \frac{30}{35} \frac{50}{50} \frac{50}{50} \frac{1}{60} = \frac{\theta_p}{360^\circ},$$

где $n_{эд}$ — частота вращения вала электродвигателя M_2 , об/мин; $\theta_p = 210^\circ$ — угол поворота распределительного вала PB_1 за время рабочего хода, °.

Формула настройки цепи подачи

$$n_{зд} = \frac{10\,690}{t_p}$$
 Машинное время обработки

одного зуба $t_m = t_{p,x} + t_{x,x}$, где $t_{x,x} = 3 \div 4,5$ с — время холостого хода.

На распределительном валу РВ₁ установлены четыре кулачка. Один из них K_1 служит для отвода и подвода стола в соответствующие моменты цикла, другой K_2 — для врезания при комбинированном методе обработки, при котором в начале рабочего цикла до определенного момента стол медленно подается вперед одновременно с обкаткой и происходит врезание инструмента. Достигнув определенной глубины зуба, врезание прекращается и происходит профилирование зуба при неподвижном положении стола. Данный метод применяют при нарезании колес с углом начального конуса больше 70° . Кулачок K_3 служит для переключения счетчика циклов, K_4 действует на путевой выключатель, дающий команду на рабочее и

ускоренное число оборотов электродвигателя М2 привода цепи подачи.

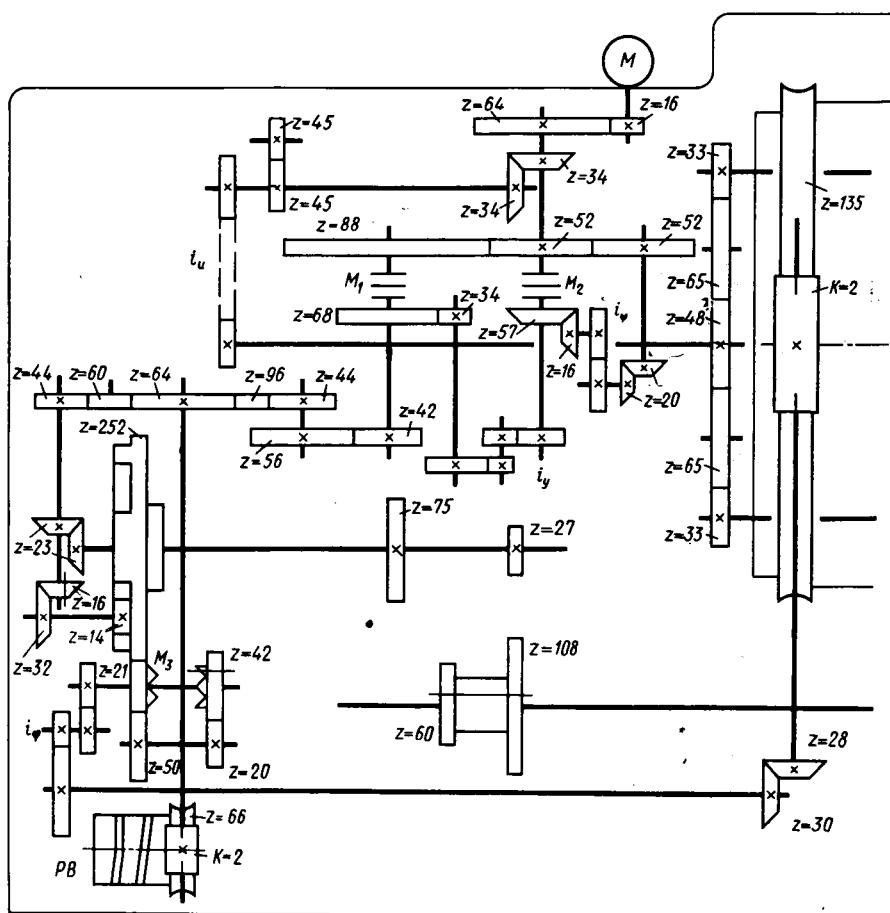
Зубофрезерный полуавтомат мод. 5230. Назначение — нарезание конических зубчатых колес с прямыми и бочкообразными зубьями.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наибольший модуль нарезаемого колеса,	8
мм	
Наибольший диаметр делительной окружности, мм	320
Длина образующей начального конуса, мм	20—150
Число зубьев нарезаемого колеса . . .	10—100

Полуавтомат работает методом обкатки; обработку ведут двумя спаренными дисковыми фрезами; режущие кромки зубьев обеих фрез составляют исходный контур зуба производящего колеса. Станок может выполнять как чистовое, так и черновое нарезание.

Цикл работы станка при чистовом нарезании аналогичен циклу работы



станка 5236П. При черновом нарезании работа происходит в основном так же, как и при чистовом, с той лишь разницей, что величина обкатки сильно уменьшается, а быстрый подвод стола заменяется медленной рабочей подачей, при которой фрезы постепенно врезаются в заготовку. По достижении полной глубины впадины стол быстро отводится назад, и происходит обратный поворот люльки на небольшой угол, достаточный для попадания в соседнюю впадину при последующем цикле. Кинематическая схема станка приведена на рис. 50.

Все движения станок получает от электродвигателя M ($N=5,5$ кВт, $n=1440$ об/мин).

1. *Главное движение* — вращение фрез:

$$n_M \frac{16}{64} \frac{34}{34} i_n \frac{48}{65} \frac{65}{33} \frac{35}{48} \frac{22}{30} \frac{17}{43} = n_\Phi,$$

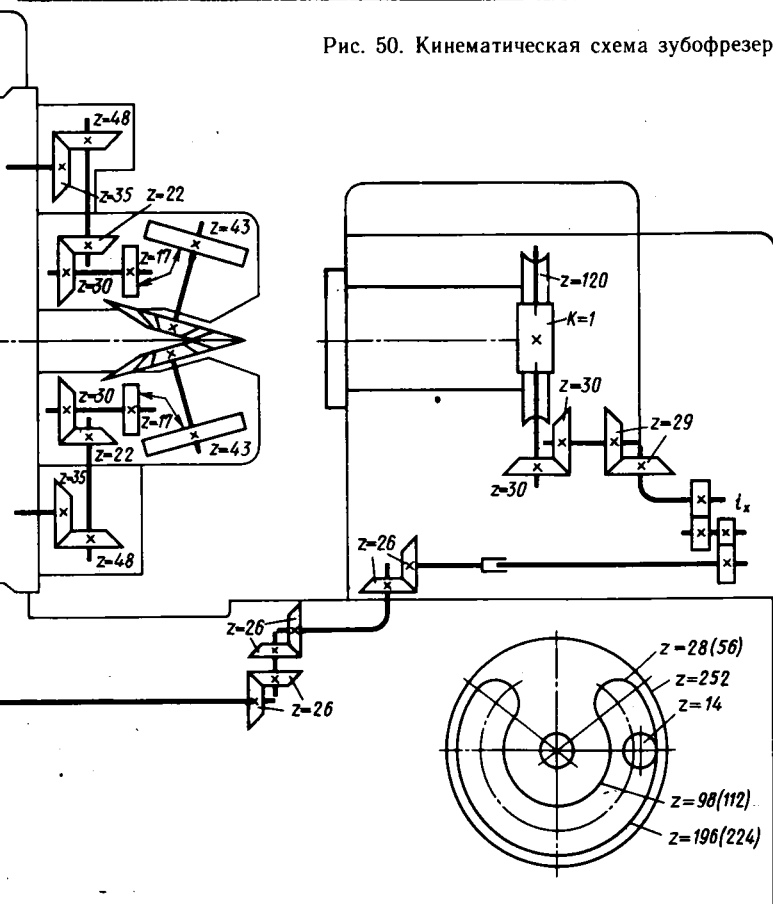
$$i_n = \frac{n_\Phi}{110}, \quad n_\Phi = \frac{1000v}{\pi d_\Phi},$$

где n_Φ — частота вращения фрезы, об/мин; v — скорость резания, м/мин; $d_\Phi=225$ мм — диаметр фрезы.

Реверсивный механизм обеспечивает реверсивное движение люльки, в него входит составное колесо, включающее внутренний венец $z=196$ (в полной окружности 224 зубца), наружный венец $z=98$ (112) и две полушестерни внутреннего зацепления $z=28$ (56). В зацеплении с составным колесом находится ведущее колесо $z=14$, которое всегда вращается в одном направлении и, сцепляясь с зубьями составного колеса, заставляет последнее вращаться вместе с наружным зубчатым колесом $z=252$.

При зацеплении ведущего колеса $z=14$ с внутренним венцом $z=196$ (224) совершается рабочий ход, при зацеплении с наружным венцом $z=98$ (112) — холостой ход, при зацеплении с полушестернями $z=28$ (56) — реверс.

Рис. 50. Кинематическая схема зубофрезерного полуавтомата мод. 5230



Число оборотов ведущего колеса $z = 14$ реверсивного механизма за период одного цикла работы станка:

$$n_{z=14} = \frac{196 + 98 + 2 \cdot 28}{14} - 1 = 24 \text{ об.}$$

Распределительный вал за один цикл работы станка сделает

$$n_{РВ} = 24_{z=14} \frac{32}{16} \frac{44}{60} \frac{60}{64} \frac{2}{66} = 1 \text{ об.}$$

2. Движение деления обеспечивает делительный поворот заготовки на z_i зубцов за один оборот распределительного вала. Уравнения кинематического баланса и формулы настройки имеют вид:

при чистовом нарезании

$$1 \text{ об. РВ } \frac{66}{2} \frac{64}{60} \frac{60}{44} \frac{23}{23} \frac{75}{60} \left(\frac{26}{26} \right)^3 \times \\ \times i_x \frac{29}{29} \frac{30}{30} \frac{1}{120} = \frac{z_i}{z}; \quad i_x = \frac{2z_i}{z};$$

при черновом нарезании

$$1 \text{ об. РВ } \frac{66}{2} \frac{64}{60} \frac{60}{44} \frac{23}{23} \frac{27}{108} \left(\frac{26}{26} \right)^3 \times \\ \times i_x \frac{29}{29} \frac{30}{30} \frac{1}{120} = \frac{z_i}{z}; \quad i_x = \frac{10z_i}{z}.$$

Число z_i , через которое совершается делительный поворот заготовки, определяют по формуле

$$z_i = \frac{\theta_{zc}}{160},$$

где θ — угол качания люльки, необходимый для полного нарезания зуба на заготовке;

$$\theta = \arccos \left(\frac{\cos \delta_a}{\cos \delta_f} \right) + 0,5\theta_z; \quad \theta_z = \frac{1200}{z_c}.$$

3. Движение обкатки согласует вращение заготовки и плоского производящего колеса (люльки). Уравнения кинематического баланса и формулы настройки имеют вид:

при чистовом нарезании (муфта M_3 включена)

$$1 \text{ об. заг. } \frac{120}{1} \frac{30}{30} \frac{29}{29} \frac{1}{i_x} \left(\frac{26}{26} \right)^3 \frac{60}{75} \times \\ \times \frac{23}{23} \frac{16}{32} \frac{14}{224} \frac{252}{21} i_\phi \frac{30}{28} \frac{2}{135} = \frac{z}{z_c}.$$

$$\text{Подставляем } z_c = \frac{z}{\sin \delta_1} \text{ и } i_x = \frac{2z_i}{z},$$

$$\text{тогда } i_\phi = \frac{3,5z_i \sin \delta_1}{z};$$

при черновом нарезании (метод врезания; муфта M_3 выключена)

$$1 \text{ об. заг. } \frac{120}{1} \frac{30}{30} \frac{29}{29} \frac{1}{i_x} \left(\frac{26}{26} \right)^3 \frac{108}{27} \times \\ \times \frac{23}{23} \frac{16}{32} \frac{14}{224} \frac{252}{21} \frac{21}{50} \frac{20}{42} i_\phi \frac{30}{28} \frac{2}{135} = \\ = \frac{z}{z_c},$$

$$i_x = \frac{10z_i}{z}, \quad \text{тогда } i_\phi = \frac{17,5z_i \sin \delta_1}{z}.$$

4. Движение подачи. Подачу в станке условно задают временем рабочего хода в секундах. Распределительный барабан РВ делает один оборот за время одного рабочего цикла. Барабан имеет две канавки: одну для работы методом врезания, другую — методом обкатки и комбинированным методом. На валу барабана имеются два кулачка, включающие в нужный момент гидрораспределители, которые управляют фрикционными муфтами рабочего и холостого хода.

Осуществление рабочей подачи при обработке способом обкатки или врезания;

$$t_p \frac{1440}{60} \frac{16}{64} i_y \frac{34}{68} \frac{42}{56} \frac{44}{96} \frac{96}{64} \frac{2}{66} = \\ = \frac{\theta_p^\circ}{360^\circ}; \quad i_y = \frac{9,5}{t_p},$$

где t_p — время рабочего хода, с; θ_p° — угол поворота распределительного вала за время рабочего хода, $\theta_p^\circ = 160^\circ$.

Осуществление рабочей подачи при обработке комбинированным способом. В данном случае нарезание зуба происходит в два этапа: врезание и обкатка. Движение обкатки во время врезания резко замедляется. При комбинированном способе нарезания работает «чистовая» кривая барабана подачи, а врезание происходит на участке кривой, который при работе способом обкатки служит для быстрого

подвода стола. Угол наклона кривой на данном участке равен 45° . Вращение барабана подачи за время врезания замедляется включением фрикционной муфты M_2 вниз (см. рис. 50):

$$t_{вр} \frac{1440}{60} \frac{16}{64} \frac{52}{52} \frac{20}{20} i_\psi \frac{16}{57} i_\nu \frac{34}{68} \frac{42}{56} \times \\ \times \frac{44}{96} \frac{96}{64} \frac{2}{66} = \frac{\theta_{вр}^\circ}{360^\circ}; i_\psi = 0,55 \frac{t_p}{t_{вр}},$$

где $t_{вр}$ — время врезания, с; $\theta_{вр}^\circ = 25^\circ$ — угол поворота барабана подачи за время врезания; $i_\nu = \frac{9,5}{t_p}$. Отношение $\frac{t_p}{t_{вр}} = \frac{t_{обк}}{t_{вр}}$. Ориентировочно принимают $\frac{t_{обк}}{t_{вр}} = 1$, где $t_{обк}$ — время обкатки, с.

При осуществлении ускоренной подачи муфты M_1 и M_2 включены вверх:

$$1440 \frac{16}{64} \frac{52}{88} \frac{42}{56} \frac{44}{96} \frac{96}{64} \frac{2}{66} = n_{x, x} = \\ = 3,32 \text{ об/мин.}$$

§ 3. Анализ перемещений инструмента и заготовки при нарезании конических зубчатых колес с круговыми зубьями

При обработке конических колес с круговыми зубьями воспроизводится

движение обкатывания заготовки по воображаемому плосковершинному производящему колесу 4 (рис. 51,а) с круговыми зубьями. Инструментом служат зуборезные головки 2, снабженные резцами 3, расположенными по окружности на торце головки. Резцы 3 (рис. 51,б) образуют зуб производящего колеса.

Резцовую головку 2 закрепляют на шпинделе, установленном в люльке 5. Во время обработки резцовая головка 2 получает главное вращательное движение вокруг своей оси O_1 и медленное вращение вместе с люлькой 5 вокруг оси O (рис. 51,в), заготовка — вращение, согласованное с вращением люльки 5 (производящего колеса 4) — движение обкатки. Согласованное вращение обеспечивается цепью обкатки с гитарой настройки 6.

После совершения рабочего хода (обработки впадины колеса) заготовка отводится от резцовой головки, и люлька получает быстрое вращение в обратном направлении. Во время холостого хода совершается делительный поворот заготовки. Далее заготовку подводят к резцовой головке, и цикл обработки новой впадины повторяется.

В процессе обкатки происходит формирование зуба нарезаемого колеса 1 (рис. 51,в). Линия зуба на плосковершинном производящем колесе получается в результате пересечения кониче-

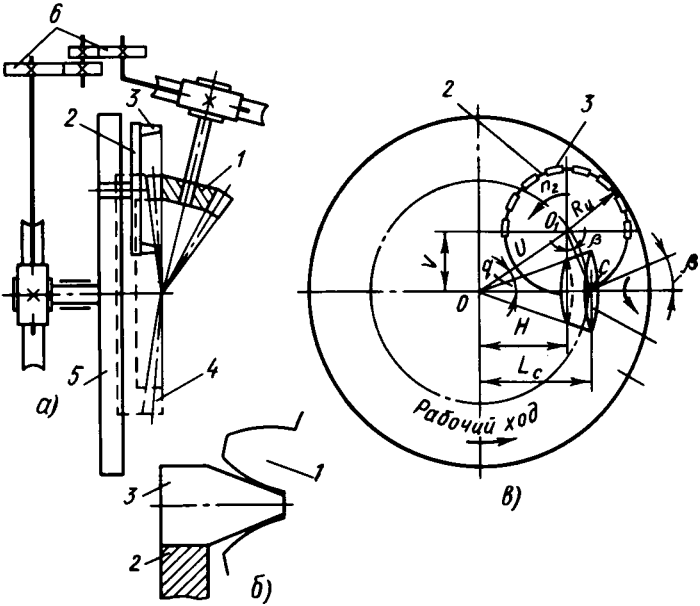


Рис. 51. Схема нарезания конических зубчатых колес с круговыми зубьями

ской производящей поверхности, описываемой вращающимися режущими кромками резцов, с начальной плоскостью производящего колеса 4. Если ось головки O_1 (рис. 51, а) перпендикулярна этой плоскости, то линия зуба является окружностью. Положение оси резцовой головки в этой плоскости определяется из условия, чтобы радиус производящего колеса L_c (в средней точке зуба C) при среднем радиусе резцовой головки $R_n = O_1C$ обеспечивал получение заданного угла спирали β . Определенные из этого условия координаты оси вращения резцовой головки O_1 — горизонтальная H , вертикальная V , угловая q и радиальная U — будут иметь следующие значения:

$$\begin{aligned} H &= L_c - R_n \sin \beta, \quad V = R_n \cos \beta, \quad q = \\ &= \arctg \frac{V}{H} = \operatorname{arctg} \frac{H}{V} = \\ &= \arcsin \left(\frac{R_n}{U} \cos \beta \right), \\ U &= OO_1 = \sqrt{H^2 + V^2} = \frac{V}{\sin q} = R_n \frac{\cos \beta}{\sin q}. \end{aligned}$$

§ 4. Кинематическая настройка станков для нарезания конических колес с круговыми зубьями

Зуборезный станок мод. 5С26В. Назначение — нарезание конических колес с круговыми зубьями высокой точности. Конструкция станка позволяет нарезать обычные конические колеса с круговыми зубьями, гипоидные колеса, ведущие колеса для полуобкатных передач и зубчатые колеса с нулевым углом спирали. Обработка производится резцовыми головками.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наибольший модуль нарезаемого колеса, мм	8
Наибольший диаметр делительной окружности, мм	320
Длина образующей начального конуса, мм	30—160

Станок работает методом обкатки, который применяется при чистовом нарезании всех видов зубчатых колес, колес обычных передач, а также для чернового нарезания. Дополнительно

предусмотрена возможность работы: методом врезания, который применяют в основном при черновом нарезании обычных колес и при чистовом нарезании полуобкатных передач; комбинированным методом, который применяется для нарезания колес (большого из пары).

Основной рабочий цикл станка — обкатка. Цикл начинается с быстрого подвода стола копиром чистовой обработки. Копир рассчитан так, что последние 1,5—2 мм хода стол плавно доводят до упора. Привод ПМУ обеспечивает требуемую скорость обкатки люльки и детали. По окончании нарезания от команды циклового барабана стол быстро отводится назад, переключается муфта реверса цепи обкатки, привод ПМУ увеличивает частоту вращения электродвигателя обкатки. Во время холостого хода производят делительный поворот заготовки. Кинематическая схема станка приведена на рис. 52.

1. *Главное движение* (вращение резцовой головки) осуществляется, от электродвигателя $M1$ ($N=3$ кВт, $n=1430$ об/мин). Уравнение кинематического баланса и формула настройки:

$$\begin{aligned} n_{M1} \frac{13}{32} i_n \frac{47}{45} \frac{34}{64} \frac{42}{43} \frac{22}{23} \frac{23}{22} \frac{25}{85} &= n_r; \\ i_n &= \frac{n_r}{92,6}, \end{aligned}$$

где n_r — частота вращения резцовой головки, об/мин.

Гитара главного движения однопарная ($\Sigma z = 102$), обеспечивает десять ступеней частот вращения шпинделя резцовой головки в пределах от 30 до 200 об/мин.

2. *Движение деления* обеспечивает поворот заготовки на один зуб во время холостого хода. Кинематической особенностью данного станка является то, что для повышения точности обработки зубчатых колес во время работы цепи обкатки (рабочий ход) суммирующий механизм, который используют для совершения делительного поворота заготовки, отключается из цепи обкатки. Вследствие этого кинематические погрешности суммирующего механизма не оказывают влияния на кинематическую точность цепи обкатки. В конечном

ки). Уравнение кинематического баланса

$$1 \text{ об. заг. } \frac{75}{5} \frac{1}{i_x} \frac{26}{26} \frac{37}{37} \frac{40}{40} \frac{23}{23} i_\Phi \times \\ \times \frac{5}{150} = \frac{z}{z_c};$$

подставим $i_x = \frac{7,5}{z}$, $z_c = \frac{z}{\sin \delta_1}$, тогда

$$\text{формула настройки } i_\Phi = \frac{15}{z_c} \text{ или } i_\Phi = \\ = \frac{15 \sin \delta_1}{z}.$$

Для повышения долговечности высокоредукционных кинематических пар при больших скоростях скольжения в данном станке конечные звенья цепи обкатки выполнены в виде гипоидных конических зубчатых колес из стали.

4. *Движение подачи.* Вращение цепи обкатки осуществляется приводом ПМУ с электродвигателем M_2 ($N=2,2$ кВт), имеющим бесступенчатое регулирование частоты вращения в диапазоне 150—1500 об/мин и позволяющим плавно изменять скорость обкатки в процессе резания по заранее заданному закону.

Рабочую подачу условно задают временем рабочего хода t_p в секундах (муфта M_1 включена влево):

$$t_p \frac{1500}{60} \frac{100}{200} \frac{17}{27} i_y \frac{31}{77} \frac{35}{29} \frac{4}{28} \frac{23}{23} \times \\ \times i_\Phi \frac{5}{150} = \frac{\theta^\circ}{360^\circ}.$$

Муфта M_2 включена, она предназначена для отключения привода обкатки от цепи обкатки при работе методом врезания. Муфту M_2 включают и выключают вручную. θ° — угол качания люльки, необходимый для обеспечения полной обработки зуба. При

$$i_\Phi = \frac{15}{z_c} \text{ формула настройки } i_y = \frac{\theta^\circ z_c}{i_p 100}.$$

При угловой скорости качания люльки

$$\omega_n = \frac{\theta^\circ}{t_p} \quad i_y = \frac{\omega_n z_c}{100}.$$

Угол качания люльки θ° при угле зацепления $\alpha = 20^\circ$ может быть опреде-

лен по формуле

$$\theta^\circ = \arccos \frac{\cos \delta_a}{\cos \delta_f} + \frac{380}{z_c} + 57,3 \frac{b}{L} \times \\ \times \lg \beta,$$

где b — ширина зубчатого венца; L — средняя длина образующей начального конуса нарезаемого колеса; β — угол спирали нарезаемого колеса.

Изменение направления вращения цепи обкатки (ускоренная подача) во время перехода с рабочего хода на холостой осуществляется фрикционной муфтой M_1 коробки подач (муфта M_1 включена вправо):

$$n_{M_2} \frac{100}{200} \frac{17}{27} i_n \frac{35}{29} \frac{4}{28} \frac{23}{23} i_\Phi \frac{5}{150} = n_{x.x},$$

$$\text{где } i_{n1} = \frac{59}{61}; \quad i_{n2} = \frac{84}{36}.$$

5. *Движение угла качания люльки.* Кинематическая цепь угла качания люльки (управления) согласует поворот люльки и циклового барабана I . Угол качания люльки вверх и вниз от центра обкатки осуществляется установкой упоров на диске управления (циклового барабан I).

В зависимости от изменения передаточного отношения i_L гитары механизма управления изменяется соотношение между углом качания люльки и углом установки упоров:

$$\frac{\theta^\circ}{360^\circ} \frac{150}{5} \frac{1}{i_\Phi} \frac{23}{23} \frac{26}{26} \frac{49}{28} i_L \frac{2}{42} \frac{45}{45} \frac{45}{30} \times \\ \times \frac{30}{45} = \frac{\theta_1^\circ}{360^\circ}, \quad i_L = \frac{1800}{\theta^\circ z_c},$$

где θ° — угол качания люльки; $\theta_1^\circ = 300^\circ$ — угол установки упоров на цикловом барабане.

На валу $в$ механизма управления закрепляют кулачок II , воздействующий на следящий гидроцилиндр стола и осуществляющий подачу стола с бабкой изделия по заданному закону и кулачок III управления скоростью обкатки, воздействующий на настроечный элемент привода ПМУ, который регулирует частоту вращения электродвигателя привода цепи обкатки.

6. *Движение модификации.* Механизм модификации обкатки осуществляет доворот люльки в процессе ре-

зания, если требуется получить какую-либо модификацию профиля зубьев нарезанного колеса. Вращение барабану модификатора передается через гитару i_z , пару конических колес $z=28$ и червячную пару $K=2$ и $z=45$. Вращение на вал к люльке при этом передается через косозубые цилиндрические колеса $z=27, 42, 42, 27$. Муфта M_4 в данном случае разомкнута. Вращаясь, барабан модификатора воздействует кулачком на ползун и через рычаг сообщает осевое перемещение блоку зубчатых колес $z=42, 42$, последний за счет косых зубьев сообщает допол-

нительный поворот вала и далее люльке.

Уравнение кинематического баланса

$$\alpha'_n \frac{150}{5} \frac{27}{42} \frac{42}{27} i_z \frac{28}{28} \frac{2}{45} = \alpha_p; \quad i_z = \frac{0,75\alpha_p}{\alpha'_n},$$

где α'_n — дополнительный угол поворота люльки; α_p — угол поворота ролика модификатора.

При работе без модификатора блок колес $z=42, 42$ выводится из зацепления с колесом $z=27$, а валы соединяются муфтой M_4 .

Глава 6

Кинематическая точность и разработка кинематики при проектировании металлорежущих станков

§ 1. Факторы, определяющие точность кинематических цепей

Кинематическая точность станка во многих случаях оказывает существенное влияние на точность изготовления детали. Это особенно важно при работе на резьбонарезных (токарно-винторезные, резьбошлифовальные) и зуборезных станках.

Под кинематическими погрешностями металлорежущих станков понимают погрешности их кинематических цепей, влияющие на точность относительных движений обрабатываемой детали и режущего инструмента в процессе обработки поверхностей.

Звенья кинематической цепи (цилиндрические, конические и червячные зубчатые пары, пары ходовой винт — гайка и др.) имеют определенные погрешности (по профилю зуба, шагу, радиальному и осевому биению, углу наклона зуба, среднему диаметру резьбы, углу профиля резьбы и др.). Величина и направление (знак) погрешностей зависят от многих факторов, они ограничены степенью точности изготовления звеньев. Погрешности вызывают ошибки в скоростях угловых и линейных перемещений исполнительных звеньев станка.

Влияние погрешности некоторого i -го звена кинематической цепи на точность перемещения последнего звена цепи (обрабатываемой детали или инструмента) определяется зависимостью

$$S_i = s_i i_i,$$

где S_i — приведенная к последнему звену ошибка перемещений i -го звена; s_i — суммарная ошибка перемещений i -го звена; i_i — передаточное отношение перемещений между i -м и последним звеном.

Влияние погрешностей промежуточных звеньев на точность перемещения последнего звена цепи состоит в том, что они трансформируются пропорционально передаточному отношению i_i перемещений между i -м и последним звеном.

Суммарная погрешность всей кинематической цепи является результатом действия целого ряда независимых факторов и определяется как вероятностная сумма отдельных погрешностей с учетом законов их распределения. Ошибки отдельных звеньев, изменяясь пропорционально передаточным отношениям, по-разному влияя на суммарную ошибку всей цепи.

Например,

у резбонарезных станков основными являются погрешности винтового механизма, в котором ошибки линейных перемещений ведомого звена — винта или гайки — могут быть вызваны как погрешностями изготовления основных элементов передачи, так и погрешностями сборки. Доминирующее влияние на точность всего механизма оказывают погрешности винтов. Кинематические погрешности зуборезных станков вызывают отклонения профиля зуба и погрешности шага нарезаемого колеса. У зубофрезерных станков привод последнего звена (стол, бабка изделия, люлька), несущего обрабатываемую деталь или инструмент, обычно осуществляется червячной передачей, резко снижающей влияние погрешностей остальных звеньев кинематической цепи. Доминирующими в данном случае являются погрешности червячной пары.

§ 2. Повышение кинематической точности станков

Повышения точности кинематических цепей можно достичь, увеличив точность входящих в цепь кинематических пар, их расположения по степени редукции, введения корректирующих устройств и др.

В резьбошлифовальных, зубошлифовальных, в некоторых координатно-расточных и других станках конечным звеном основных кинематических цепей является механизм ходовой винт — гайка, и его точность оказывает доминирующее влияние на точность обработки. Однако при применении корректирующих устройств точность винтовых механизмов эффективно повышается, а следовательно, и повышается кинематическая точность всей цепи. При построении корректирующих устройств определяют точности перемещения гайки по ходовому винту и в соответствии с выявленными ошибками строят коррекционную линейку.

Погрешности перемещения винтовой пары измеряют механическим или оптическим способом. На рис. 53,а показана принципиальная схема одного из механических способов измерения погрешностей с использованием эталонного винта. Измерения производят на специальном стенде в термоконстантном помещении. Проверяемый ходовой 1 и эталонный 4 винты соединены зубчатыми колесами 6 с передаточным отношением $i=1$, поэтому они вращаются синхронно. На каретке 3, перемещаемой эталонным винтом 4, установлен индикатор 5. Шток индикатора упирается в торец гайки 2, перемещаемой винтом 1. Рассогласования в переме-

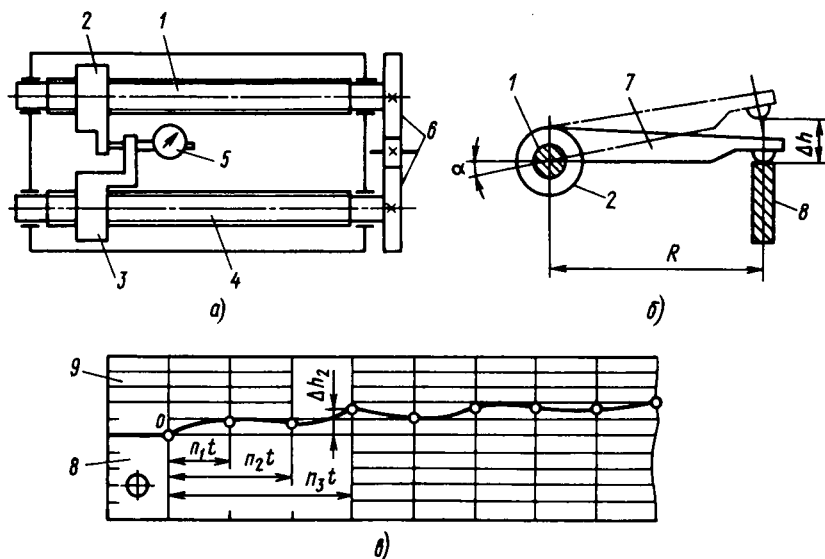


Рис. 53. Схема измерения погрешностей в нарезке ходового винта

шениях каретки 3 и гайки 2, вызываемые погрешностью нарезки винта 1, фиксируют индикатором. При измерении точности перемещения гайки 2, винту 1 сообщают n_1 оборотов ($n=1, 2, 3...$) и записывают погрешность перемещения Δp_1 по показанию индикатора, далее возвращенному в нулевое положение винту сообщают n_2 оборотов ($n_2=2 n_1$) и записывают погрешность перемещения Δp_2 , и т. д. пока не будет проверен полностью весь ходовой винт. Для получения более точных значений погрешностей перемещения гайки 2 каждый участок ходового винта 1 проверяют несколько раз, начиная с нулевого положения. Далее производят пересчет погрешностей перемещения Δp на высоты профиля кривой коррекционной линейки Δh , соответствующие перемещению гайки на величину nP (P — шаг ходового винта), строят коррекционную линейку и производят ее изготовление.

Формулу для расчета высот профиля кривой коррекционной линейки выводят исходя из габаритных размеров и конструктивной схемы рычажной системы коррекционного устройства. Один из вариантов рычажной системы коррекционного устройства приведен на рис. 53,б (7 — рычаг, 8 — коррекционная линейка, α — угол поворота рычага 7, соответствующий высоте профиля кривой коррекционной линейки. Поворот гайки 2 на угол 360° вызывает дополнительное перемещение, равное шагу резьбы винта. Следовательно, для придания системе некоторого дополнительного перемещения Δp требуется поворот гайки 2 на угол $\alpha = \frac{\Delta p}{P} 360^\circ$, которому соответствует

высота профиля кривой коррекционной линейки $\Delta h = R \sin \alpha = R \sin \left(\frac{\Delta p}{P} 360^\circ \right)$,

где R — радиус рычага 7.

Заменив значение $\frac{360^\circ}{P} = K$, окончательно получим формулу

$$\Delta h = R \sin (K \Delta p).$$

Пример построения коррекционной линейки приведен на рис. 53,в. Верхнюю часть заготовки 9 срезают, а нижняя 8 становится коррекционной линейкой (Δh_3 — высота профиля кривой коррекционной линейки на расстоянии $n_3 P$).

На рис. 54 приведена конструкция коррекционного устройства резьбошлифовального станка мод. 582. В корпус 6, прикрепленный к столу станка, ввинчена гайка 7 ходового винта. На ней закреплен рычаг 3, который под давлением пружины 1 поворачивает гайку до упора шарика 2, установленного на втором плече рычага, в линейку 5. Эта линейка имеет криволинейный профиль, воздействующий на гайку таким образом, что в результате ее поворота стол станка получает дополнительные перемещения, равные по величине и противоположные по знаку ошибке механизма, компенсируемой по длине участка. Таким образом, приданием линейке соответствующего профиля, обеспечивают повороты гайки 7, компенсирующие погрешности шага ходового винта.

Одними из основных источников погрешностей в зуборезных станках, оказывающих влияние на точность обработки зубчатых колес, являются погрешности кинематических цепей об-

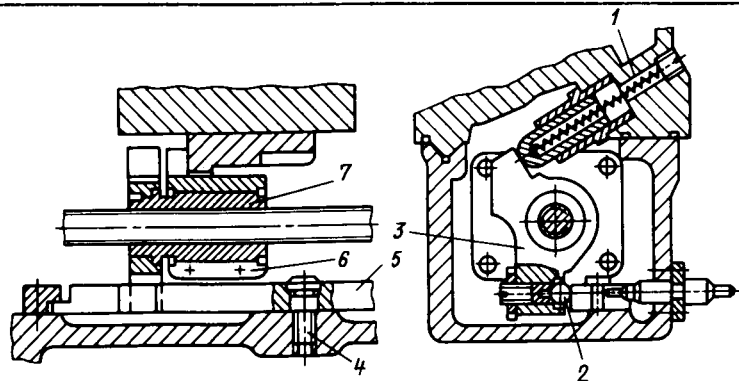


Рис. 54. Корректирующее устройство резьбошлифовального станка мод. 582

катки и деления. В зубофрезерных и зубодолбежных станках для повышения точности обработки применяют различные корректирующие устройства для компенсации погрешностей угловых перемещений червячных пар.

Основными источниками циклических погрешностей в станке для нарезания конических зубчатых колес являются дифференциалы и сменные зубчатые колеса гитары деления. Для снижения циклических погрешностей зубообработки конических колес в некоторых станках частично или полностью исключают из цепи обкатка—деление дифференциал и сменные колеса гитары деления.

§ 3. Проектирование кинематических схем станков

Разработка кинематической схемы является первой стадией проектирования станка. Проектирование кинематических схем включает: а) выбор принципиальной схемы станка; б) анализ движений инструмента и заготовки в процессе обработки; в) выбор принципиальных схем исполнительных механизмов, обеспечивающих необходимые перемещения инструмента и заготовки; г) составление структурной схемы станка; д) составление общей кинематической схемы станка. Производится выбор типов передаточных механизмов, составление кинематических цепей и кинематический расчет.

При проектировании кинематических цепей (деления, обкатки и др.) следует учитывать:

1) количество промежуточных звеньев, составляющих кинематическую цепь, должно быть наименьшим;

2) зубчатые передачи от ведущего вала до конечного звена цепи располагать в порядке возрастающей степени редукции;

3) избегать повышающих передач, червячных с многозаходными червяками, которые обладают дополнительными линейными ошибками;

4) звенья с большими угловыми ошибками располагать ближе к звену привода; особо точными должны быть конечные звенья цепи (в частности, диаметр делительного червячного колеса желательно делать значительно больше максимального диаметра обрабатываемого колеса);

5) следует стремиться к уменьшению осевых линейных ошибок червяков и ходовых винтов, так как они без всякого уменьшения переходят на сопряженные с ними звенья;

6) органы настройки цепей подачи, обкатки и деления располагать ближе к конечным звеньям; сменные колеса желательно брать по возможности большего диаметра; они имеют меньшие угловые ошибки;

7) не применять зубчатые колеса с скорректированным зацеплением; в особо точных цепях возможно применение зацепления с $\alpha = 15^\circ$.

Глава 7 Основные технические показатели станков

§ 1. Развитие конструкций станков

В курсе «Расчет и конструирование металлорежущих станков» изучаются основные методы расчета и конструирования станка и его механизмов и деталей из условия обеспечения качественной и количественной стороны процесса обработки. Это условие означает, что прочность, жесткость, износостойкость, виброустойчивость и другие характеристики деталей и элементов станка, а также компоновка, технические и эксплуатационные показатели станка должны обеспечить требуемые точность обработки и качество поверхности при высокой производительности и экономичности процесса.

В данном разделе изложен общий методологический подход к расчету отдельных деталей и механизмов; исходя из требований к данным целевым элементам и к станку в целом дан анализ факторов, определяющих конструкцию станка. Отдельные виды расчетов представляют самостоятельные области и поэтому выделены из данного курса (см. разделы 3, 4, 6, 8).

Для оценки степени развития станка рассмотрим те функции, которые он выполняет при осуществлении данного технологического процесса. Изготовление любой детали на станке состоит из четырех основных этапов: установление программы (задания), включающей технические условия на объект обработки; управление процессом (изменение и включение скоростей, согласование различных движений), осуществление процесса обработки (сообщение необходимых усилий и скоростей заготовке и инструменту с требуемой

точностью взаимного перемещения) и контроль процесса (оценка соответствия технологического процесса заданию и внесение необходимых поправок в ход процесса).

Приведенные этапы обработки и взаимодействие между ними можно представить в виде блок-схемы (схема 1). Рассматриваемая схема включает обратную связь:



Рассмотрим, как данная блок-схема реализуется на практике в зависимости от степени развития технологической машины — станка.

Осуществление любого технологического процесса, даже если он выполняется вручную, также соответствует приведенной блок-схеме, но все функции выполняет человек. В этом случае управляет процессом мозг человека, осуществляют процесс его руки и контролируют — глаза. Эти функции человека не изменяются и в том случае, когда его труд облегчается благодаря применению рабочего инструмента.

Первая стадия развития станков характеризуется применением таких механизмов, которые облегчают труд рабочего. Однако такие станки-орудия не имеют механизмов, которые непосредственно осуществляют технологический процесс изготовления изделия. Эти станки-орудия дошли и до наших дней. Электродрель для сверления, станки

для ручной заточки инструмента, опилочные станки и другие аналогичные машины, хотя и имеют современный электропривод, но при их использовании ход технологического процесса всецело зависит от квалификации рабочего.

Вторая стадия развития станков наблюдается тогда, когда станок из «орудия» превращается в «машину». Это связано с выполнением станком самого технологического процесса без участия человека, когда специальные механизмы осуществляют необходимые относительные движения заготовки и инструмента. К станкам-машинам относятся большинство универсальных станков — токарных, фрезерных, расточных и др.

Третья стадия развития станков — станки-автоматы, функции управления циклом которых осуществляются уже не рабочим, а механизмами самого станка. Одно- и многшпиндельные токарные автоматы, агрегатные сверлильно-расточные станки, копировально-фрезерные, шлифовальные и многие другие станки-автоматы широко применяют в промышленности, обеспечивая высокую производительность труда.

Однако контроль технологического процесса по-прежнему осуществляет человек. Наладчик наблюдает за работой станка. Он должен периодически подналадживать механизмы и инструмент, заменять износившийся инструмент, регулировать его положение, исправлять небольшие неполадки в станке, контролировать качество выпускаемой продукции. Обратная связь, необходимая для успешного выполнения заданной программы, в обычных станках-автоматах выполняется человеком.

Четвертая стадия развития станков характеризуется полной реализацией механизмами станка блок-схемы технологического процесса. Применение специальных датчиков, которые следят за параметрами технологического процесса, за механизмами, инструментом, заготовкой и окружающей средой и вносят коррективы в управление станком, позволит создать новый тип станков — саморегулируемые станки-автоматы. Такой станок в отличие от обычного станка-автомата выполняет

все функции по управлению ходом технологического процесса, полностью освобождая от участия в нем человека.

§ 2. Технические показатели станков

Технические показатели станка должны оценить его качественные и количественные параметры, возможную область применения, дать характеристику основных особенностей станка. К ним в первую очередь относятся следующие показатели.

Технологические возможности станка. Размеры и форма деталей и поверхностей, которые могут быть обработаны на станке, возможность установления необходимых режимов обработки (скоростей, подач, нагрузок), применимость станка для обработки различных материалов являются исходной характеристикой при выборе станка для осуществления данного технологического процесса. Возможности станка по обработке деталей различной конфигурации зависят от его универсальности. Технологические возможности станка характеризуются не только способностью обработать на станке определенные поверхности и детали, но и точностью, с которой может быть осуществлена данная обработка, а также производительностью станка, достигнутой в заданных производственных условиях.

Точность станка. По точности станки делят на классы:

Н — станки нормальной точности — наиболее распространенный класс станков, обеспечивающий обработку деталей примерно 7-го качества точности;

П — станки повышенной точности, изготовленные преимущественно на базе станков нормальной точности при более высоких требованиях к качеству производства и к качеству базовых деталей станка (шпинделя и его опор, направляющих, ходового винта, станины);

В — станки высокой точности; высокая точность обработки на этих станках обеспечивается благодаря специальной конструкции отдельных элементов, высокого качества их изготовления и использования станков в специальных условиях;

А — станки особо высокой точности,

изготовленные с более жесткими требованиями к основным механизмам и деталям, чем для класса В;

С — станки особо точные, специальные мастер-станки, служащие для изготовления деталей, определяющих точность прецизионных станков. На этих станках изготавливают такие детали, как делительные и эталонные колеса, измерительные винты и др.

Соотношение между величинами допусков при переходе от класса к классу для большинства показателей принято $\varphi = 1,6$.

Производительность станка. Производительность удобнее подсчитывать в штуках продукции, выпускаемой в единицу времени. Она зависит от времени, затраченного на процесс резания, от длительности вспомогательных движений цикла и простоев станка при его ремонте и подналадке. В современных высокопроизводительных станках стремятся применять совершенные технологические процессы, повышать режимы обработки и сокращать длительность вспомогательных движений за счет автоматизации станка. Повышению производительности способствует создание многоинструментных и многошпиндельных станков, когда в данном станке осуществляется принцип концентрации операций, т. е. возможность одновременной обработки на станке различных поверхностей многими инструментами.

Экономические и эксплуатационные показатели станка. Уменьшение стоимости изготовления и эксплуатации станка достигается упрощением его конструкции, повышением ее технологичности, широким применением стандартных и унифицированных механизмов и деталей, сокращением занимаемых площадей, улучшением условий эксплуатации и обслуживания, повышением коэффициента полезного действия станка, снижением металлоемкости.

Технологический процесс, для осуществления которого предназначен станок, должен быть эффективным и учитывать последние достижения технологии. Экономические, эксплуатационные и технические характеристики станка, а также безопасность работы на нем тесно связаны с его конструктивными особенностями и методом компоновки.

§ 3. Компоновка станка

Компоновку станка следует рассматривать как целесообразное размещение элементов станка по отношению к обрабатываемой детали (рис. 55). Оси координат станка X; Y; Z, согласно рекомендациям международного стандарта ИСО, располагают так, что ось Z совмещается с осью главного шпинделя (или параллельна ей), ось X — всегда горизонтальна, а положение оси Y определяется по расположению двух других в «правой» системе координат (правило правой руки).

Рассмотрим четыре типовые группы компоновок станков.

1. Узел инструмента 1 расположен спереди или сзади обрабатываемой детали (рис. 55, а). К этой группе относятся токарные, круглошлифовальные, зубофрезерные станки для нарезания реек и др. Для них, несмотря на различные конструкции, характерно горизонтальное расположение станины.

2. Узел инструмента 1 расположен сбоку детали 2 (рис. 55, б). К этой группе относятся зубофрезерные, горизонтально-расточные, зубострогальные, горизонтально-протяжные и др. Для этих станков характерна компоновка всех основных элементов вдоль оси Y и отсутствие выступающих в направлении X корпусных деталей. В них достигается хороший доступ к детали и возможность создавать рамные конструкции.

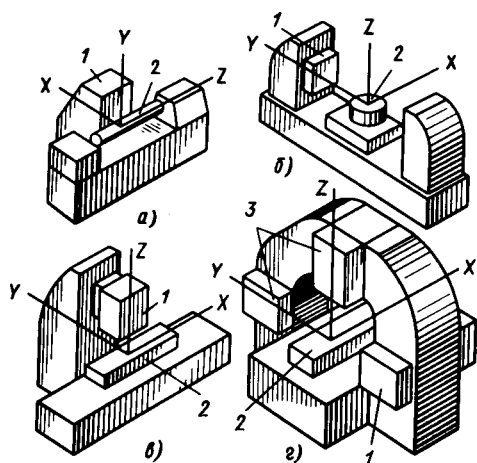


Рис. 55. Схемы компоновок станков

3. Узел инструмента 1 расположен над деталью 2 (рис. 55, а). К этой группе относится большое число типов станков: горизонтально- и вертикально-фрезерные, плоскошлифовальные, сверлильные, долбежные, зубодолбежные, координатно-расточные, хонинговальные и др. Верхнее расположение инструмента удобно с точки зрения простого доступа к детали, ее транспортируемости, удобства наблюдения за процессом обработки. Для этих станков, несмотря на разнообразие конструктивных форм, характерна вертикальная компоновка по оси Z и соответственно вертикальная форма станин.

4. Верообразное расположение узлов инструмента 1 по отношению к детали 2 (рис. 55, г). Для станков этой группы характерно наличие нескольких узлов инструмента, которые одновременно обрабатывают деталь с разных сторон. К ним относятся карусельные, продольно-строгальные, продольно-фрезерные и некоторые типы координатно-расточных станков. Для станков этого типа характерно наличие жесткой рамы (портала), на которой укреплены узлы инструмента (строгальные суппорты, фрезерные бабки и др.). Для менее мощных станков допускается и незамкнутая рама, состоящая из стойки и траверсы (хобота).

В станкостроении встречаются и другие компоновки, но перечисленные случаи являются наиболее распространенными. От рациональной компоновки станка зависят многие его показатели. Так, применение вертикальной компоновки вместо горизонтальной способствует сокращению занимаемой площади на 30—40%. Эксплуатационные характеристики — удобство обслуживания, безопасность работы на станке, быстрота и удобство регулирования, замены и ремонта элементов станка, хороший отвод стружки из зоны резания — также зависят от компоновки станка. Расположение рабочей зоны в пространстве должно учитывать рост и положение рабочего у станка и быть легко доступной и обзоримой. Существенное влияние на компоновку станка оказывают требования точности и величина передаваемых сил.

Станок данного назначения может иметь любую компоновку из четырех

основных типов (см. рис. 55), и, кроме того, в пределах этой схемы всегда имеются различные варианты в зависимости от характера перемещения основных узлов станка (например, перемещается стол с деталью или стойка с инструментом).

Для выбора рациональной компоновки формализуют их основные виды с помощью введения символических обозначений, выявляют возможные варианты, отбрасывают неприемлемые и выбирают наиболее целесообразный вариант. Так, Ю. Д. Врагов [7] предлагает записывать структурную формулу компоновки, в которой символами обозначены неподвижный узел (О) и подвижные (X, Y, Z, A, B, C) элементы. Запись начинается с элемента станка, несущего заготовку, и кончается элементом, несущим инструмент. Так, для станка вертикальной компоновки (рис. 55, -б) структурная формула имеет вид XOYZ (стол с деталью перемещается вдоль оси X, нижняя часть вертикальной стойки неподвижна, сама стойка перемещается вдоль оси Y и узел инструмента перемещается вдоль оси Z). Формула OXYZ означает компоновку, при которой стол с деталью неподвижен, а стойка перемещается вдоль оси X. Всего возможны 24 варианта — по числу перестановок символов в формуле XYZO. Эти варианты можно изобразить в виде матрицы полного множества, из которой отбирать варианты подмножеств.

§ 4. Этапы проектирования и изготовления новых станков

Основные этапы проектирования и изготовления (стадии разработки) новых станков, как и любых других машин, регламентированы ЕСКД (ГОСТ 2.103—68). Процесс создания нового станка является весьма сложным и содержит многие мероприятия для обеспечения этапов от технического задания на станок до запуска его в серию (рис. 56). Он является результатом творческого труда большого коллектива людей — конструкторов, технологов, мастеров, рабочих.

Техническое задание обосновывает целесообразность создания нового станка и устанавливает его основное назна-

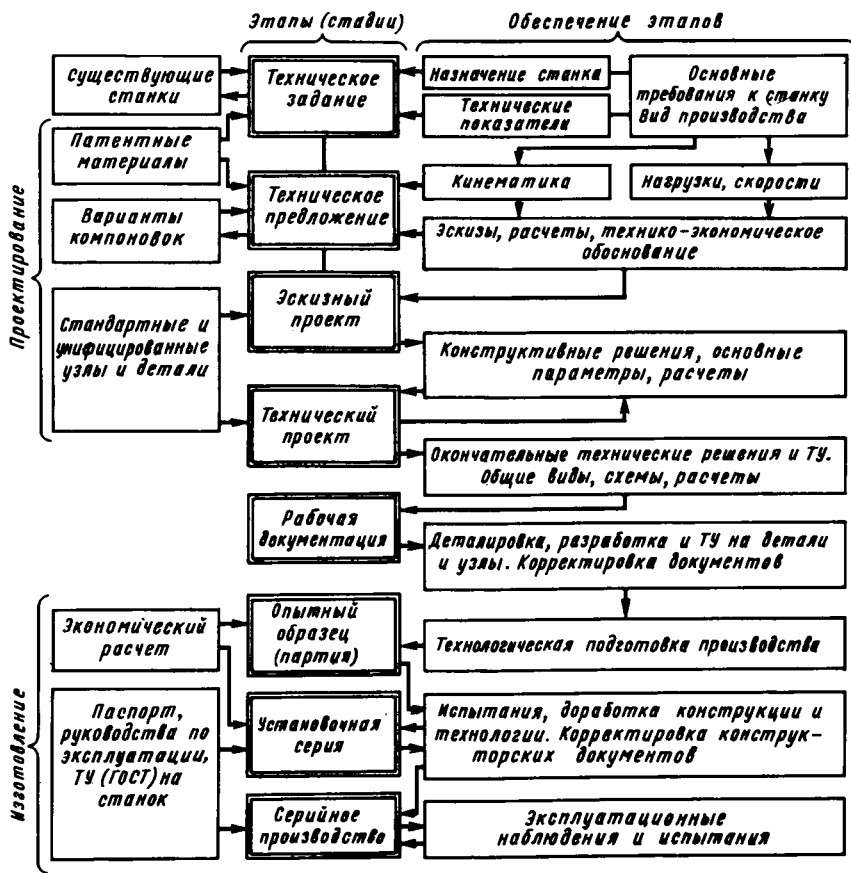


Рис. 56. Основные этапы проектирования и освоения новых станков

чение и технические характеристики, вид производства, для которого предназначен станок. Новый станок должен иметь более высокие технические показатели по сравнению с существующими станками, обеспечивать явные преимущества в случае его применения, например повышение точности и производительности станка, уменьшение занимаемой им площади, простоту конструкции станка, увеличение его универсальности и т. д. Для принятия решения о разработке проекта на станок большое значение имеет расчетная лимитная цена станка.

Основной вопрос технического задания заключается в указании и обосновании тех новых качеств, которыми должен обладать проектируемый станок. Для того чтобы выявить преимущества предлагаемого варианта, анализируют характеристики лучших станков данного типа. Исходными данными

для обоснования основных технических показателей станка и уточнения его технологического назначения являются предложенный технологический процесс обработки и анализ номенклатуры обрабатываемых деталей, вид производства (серийное, массовое), требование к точности и качеству обрабатываемых поверхностей.

Техническое предложение содержит совокупность конструкторских документов, которые обосновывают целесообразность разработки документации на станок, оно уточняет и развивает техническое задание. На этом этапе выбирают окончательный вариант компоновки станка, разрабатывают его кинематическую схему (см. гл. 6), а также принципиальные гидравлическую и электрическую схемы. Рассчитывают общие габаритные размеры и компоновку основных элементов станка, устанавливают его окончательные тех-

нические характеристики и проводят технико-экономическое обоснование целесообразности его проектирования. Техническое предложение дает полное представление об облике и возможностях станка.

Эскизный проект содержит принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы станка на основании проектных расчетов и анализа различных вариантов возможных решений. Исходными данными для расчетов являются параметры режимов обработки — величина скоростей резания и подачи, силы резания, возникающие при осуществлении заданных технологических процессов. Величина и направление резания оказывают решающее влияние на конструкцию станка. Направление и величина силы резания P характеризуется величиной ее осевой, радиальной и тангенциальной составляющих: P_x , P_y и P_z . Их расчет и определение рассматриваются в курсе «Резание металлов». Во время холостых ходов, когда не происходит резания, преодолеваются силы инерции перемещаемых узлов и силы трения, возникающие в направляющих и кинематических парах. Эти силы также определяют размеры многих механизмов станка. Для расчета станков все шире применяют ЭВМ.

При разработке конструкции станка максимально используют стандартные и унифицированные детали и механизмы. Обычно проектируют гамму станков, сходных по конструкции, но имеющих измененное назначение, иные характеристики или размеры.

Технический проект содержит окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого станка. В нем представлены исходные данные для разработки рабочей документации. На этой стадии принимают и разрабатывают окончательные технические решения и технические требования, выполняют общие виды станка и схемы, производят необходимые дополнительные расчеты. Технический проект согласовывают и утверждают в установленном порядке.

Разработка рабочей документации — последняя стадия проектирования —

включает разработку рабочих чертежей оригинальных деталей и технических условий к ним, при необходимости корректируют технический проект. Рабочая документация содержит все данные, необходимые для разработки соответствующей технологической документации. Это последняя стадия проектирования, так как теперь имеются все необходимые данные для изготовления станка. Далее следуют этапы изготовления и доводки нового станка.

Опытный образец (или партия) изготавливают для того, чтобы проверить и испытать конструкцию нового станка и внести при необходимости исправления, так как в процессе изготовления и сборки станка и после его испытания могут выявиться отдельные конструктивные и технологические недостатки. Опытный образец исследуют в заводской лаборатории испытания станков (ЛИС), где проверяют точность, жесткость, виброустойчивость, КПД, шум, тепловыделение и другие параметры и характеристики станка.

Станок испытывают также при обработке типовых деталей при нормальных и повышенных режимах работы. На этой стадии проводят экономические расчеты, которые должны оценить эффективность, полученную в результате применения новой модели станка. Конструкторские документы корректируют по результатам государственных, межведомственных, приемочных и других видов испытаний опытного образца (опытной партии) станка.

Установочная серия выпускается перед серийным производством станка с тем, чтобы проверить конструкцию в производственных условиях, исследовать работоспособность станка в наиболее напряженных условиях эксплуатации, выявить слабые стороны конструкции и внести соответствующие изменения. На этой стадии разрабатывают также основные документы станка — его паспорт, руководство по эксплуатации, технические условия на его показатели согласно стандартам.

Серийное производство станка организуют после исправления конструкции на основании проведенных испытаний. Однако творческая работа конструкторов на этом не кончается. Как бы

ни были всесторонними испытания станков в лаборатории и в условиях опытной эксплуатации, при длительной работе станка, как правило, выявляются новые обстоятельства, требующие дальнейшего совершенствования конструкции. Только на основе постоянной

творческой связи конструкторов и эксплуатационников можно создать высококачественные серийные образцы станков, отвечающие требованиям современного производства и удовлетворяющие разнообразным запросам различных отраслей промышленности.

Глава 8

Анализ работоспособности станков

§ 1. Модель для оценки работоспособности станка

Спроектированный и изготовленный станок должен обладать работоспособностью в принятых условиях эксплуатации. Работоспособность любого объекта — это такое его состояние, при котором он способен выполнять заданные функции, а его параметры находятся в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Для металлорежущего станка его основными параметрами являются установленные технические характеристики, и в первую очередь точность и производительность. При этом необходимо, чтобы станок сохранял высокие начальные параметры качества в течение всего периода работы. При эксплуатации станок подвергается многочисленным внешним и внутренним воздействиям. Все виды энергии, и в первую очередь механическая и тепловая, действуя на станок и его механизмы, вызывают в нем нежелательные процессы, создают условия для ухудшения его технических характеристик.

Часть процессов, происходящих в станке и влияющих на его технические характеристики, обратима, так как они временно изменяют параметры деталей и всей системы в определенных пределах, без тенденции прогрессивного ухудшения. Наиболее характерный пример обратимых процессов — деформации, происходящие под действием внешних и внутренних сил. Необратимые процессы, например износ, коррозия, приводят к постепенному ухудшению технических характеристик станка с течением времени.

На изменение показателей качества станка влияет скорость процессов, действующих на его механизмы. По величине скорости протекания эти процессы можно разбить на три категории.

Быстропротекающие процессы имеют периодичность изменения, измеряемую долями секунды. Эти процессы заканчиваются и возникают при обработке каждой следующей детали. К ним относятся вибрации, изменения сил трения в подвижных соединениях, колебания рабочих нагрузок и другие процессы, влияющие на взаимное положение инструмента и заготовки.

Процессы средней скорости протекают во время непрерывной работы машины, их длительность измеряют в минутах или часах. Они приводят к монотонному изменению начальных параметров машины. К этим процессам относятся как обратимые (изменения температуры станка и окружающей среды, влажности среды), так и необратимые процессы (износ режущего инструмента, который протекает во много раз интенсивнее, чем изнашиваются детали и узлы станка).

Медленные процессы протекают во время работы станка между его периодическими осмотрами или ремонтами. Они длятся дни и месяцы. К таким процессам относятся износ основных механизмов машины, перераспределение внутренних напряжений в деталях, ползучесть металлов, загрязнение поверхностей трения, коррозия, сезонные изменения температуры. Эти процессы также влияют на точность, КПД и другие параметры станка, но изменения их происходят очень медленно.

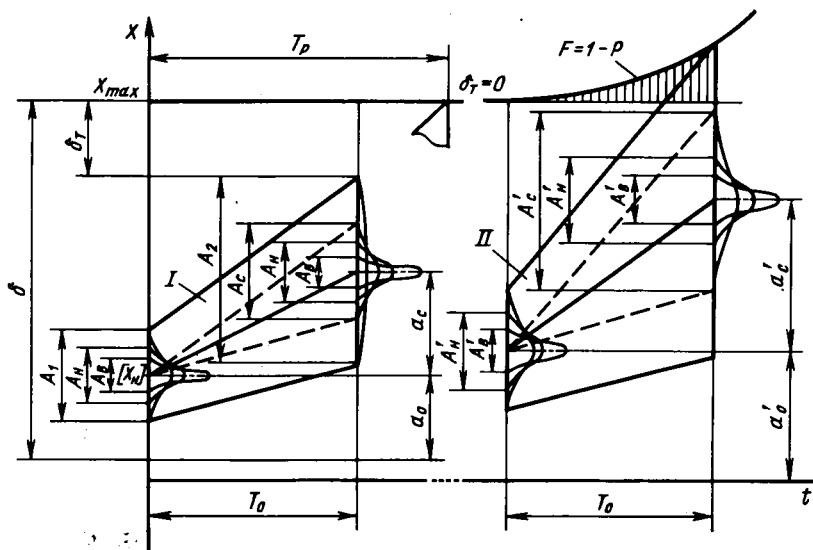


Рис. 57. Схема потери станком работоспособности по точности обработки в процессе его эксплуатации

Рассмотрим схему потери станком работоспособности при его эксплуатации в результате действия указанных категорий процессов (рис. 57). Пусть X — один из выходных параметров станка, характеризующих его точность — точность (погрешность) установки стола станка в заданное положение, точность осуществления траектории перемещения режущей кромки инструмента и др. Данный параметр должен находиться в пределах допуска δ , установленные техническими требованиями на станок. Станок имеет начальные погрешности изготовления (геометрическая и кинематическая точность), обладает определенной жесткостью, при этом параметр X принимает некоторое значение a_0 , которое является статической характеристикой качества нового станка по данному параметру. Как только станок начнет работать, быстропротекающие процессы, которые являются случайными, приведут к рассеянию значений параметра $X = a_0$. Поле рассеяния A_1 может являться результатом действия различных факторов, например рассеяния от вибраций A_b и от неточности механизма настройки станка A_n . При вероятностном методе сложения и нормальном законе распределения получим

$$A_1 = \sqrt{A_b^2 + A_n^2} \quad (3)$$

При дальнейшей работе станка в течение некоторого межналадочного периода T_0 будут действовать процессы средней скорости, в первую очередь тепловые деформации, которые приведут к дальнейшему ухудшению начальной точности станка. На схеме показано, что параметр X за период T_0 изменится на величину a_c . Однако этот процесс является случайным и имеет рассеяние, которое учитывается значением A_c . Поэтому в конце периода T_0 значение X будет характеризоваться рассеянием относительно координаты $X = a_0 + a_c$ с полем рассеяния:

$$A_2 = \sqrt{A_b^2 + A_n^2 + A_c^2} \quad (4)$$

За этот период работы состояние станка по параметру X , который характеризует его работоспособность, будет определяться областью I , в пределах которой будут находиться все значения параметра X . Поскольку $X < \delta$, станок находится в работоспособном состоянии. Условие работоспособности по параметру X

$$a_0 + a_c + 0,5 \sqrt{A_b^2 + A_n^2 + A_c^2} < X_{\max}, \quad (5)$$

где $X_{\max}$ — наибольшее допустимое значение параметра.

Новый станок должен обладать запасом работоспособности, в данном

случае по точности, который может характеризоваться либо значением неизрасходованной части допуска δ , либо коэффициентом

$$K_T = \frac{\delta}{\delta - \delta_T} = \frac{\delta}{a_0 + a_c + 0,5A_2} > 1. \quad (6)$$

Коэффициент резерва точности K_T показывает, во сколько раз допустимое значение параметра X больше наиболее неблагоприятного из возможных при заданных условиях работы. Запас по параметру необходим потому, что при дальнейшей эксплуатации будет проявляться действие медленно протекающих процессов, и в первую очередь износа. В результате все составляющие, определяющие размеры области I , будут возрастать. Когда запас по параметру будет израсходован ($\delta_T = 0$ и $K_T = 1$), наступит предельное состояние станка, после которого он потеряет свою работоспособность. Время до достижения этого состояния $t = T_p$ будет ресурсом станка по точности. Изучением процесса потери станком работоспособности, численной оценкой его состояния и методами повышения его сопротивляемости различным вредным процессам занимается наука о надежности станков (см. раздел 4). Рассмотренная модель для оценки работоспособности станка показывает, какие основные требования должны предъявляться к его параметрам: 1) станок должен иметь высокие начальные показатели — геометрическую точность, жесткость, прочность; 2) станок должен обладать высокой сопротивляемостью к возникшим процессам, т. е. быть виброустойчивым, стойким к тепловым деформациям, износостойким.

§ 2. Начальные (статические) показатели качества станка

Геометрическая и кинематическая точность станков. Станок в первую очередь должен обеспечивать необходимую геометрическую точность всех его элементов. Вследствие неточного расположения отдельных механизмов и деталей станка и неточности основных направляющих элементов происходит нарушение тех геометрических траекторий, по которым перемещаются основные рабочие органы стан-

ка. Например, из-за погрешностей подшипников шпинделя или овальности его шеек происходит радиальное биение шпинделя, которое искажает форму обрабатываемой детали в поперечном направлении. Отклонение от прямолинейности направляющих скольжения приводит к искажению траектории перемещения суппортов и столов станка, что также искажает форму обработанной поверхности.

В нормах точности металлорежущих станков указаны допустимые отклонения (погрешности) для различных типов станков и методы проверки всех основных элементов станка.

Помимо геометрической различают кинематическую точность, которая необходима для характеристики тех станков, в которых форма обрабатываемой поверхности зависит от соотношения скоростей относительного перемещения инструмента и заготовки.

Большое влияние на точность обработки в координатно-расточных и других станках оказывает точность измерительных и отсчетных устройств, предназначенных для перемещения стола, суппорта с деталью или инструментальной головкой.

Геометрическая и кинематическая точность станков являются необходимыми, но не достаточными условиями для обеспечения высокого качества станка. Надо также учитывать сопротивляемость его деталей действию внешних и внутренних сил.

Прочность станков. Элементы и детали станка должны обладать такой прочностью, чтобы в течение всего периода эксплуатации не происходило их поломок. Поломка — недопустимый вид выхода из строя детали — является следствием неправильного расчета и подбора материала или недопустимых методов эксплуатации. Поломки деталей из-за усталости происходят в шпинделях и валах, зубчатых колесах и носят аварийный характер.

Статическая прочность определяет размеры лишь некоторых деталей станков: кронштейнов, медленно вращающихся валов и зубчатых колес, крепежных винтов, некоторых корпусных деталей. Расчет ведут по формулам сопротивления материалов, как это принято в курсах деталей машин.

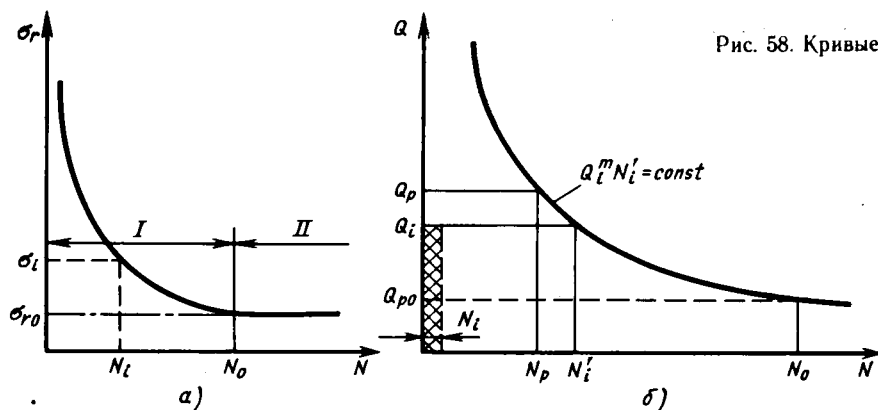


Рис. 58. Кривые усталости

Сопротивление усталости определяет размеры большинства деталей станка, так как наличие переменных напряжений характерно для деталей привода и исполнительных механизмов — валов, деталей многих механизмов, у которых напряжения периодически изменяются. Детали, работающие в условиях переменной нагрузки, могут иметь ограниченный срок службы. Кривая усталости, изображенная в координатах σ_r — предел выносливости, N — число циклов нагружения (рис. 58,а), показывает, что если напряжения не превосходят σ_{r0} — длительного предела выносливости, то деталь будет иметь теоретически неограниченный срок службы. N_0 — база испытаний, которая соответствует границе двух участков кривой усталости: I — временного предела выносливости (ограниченный срок службы деталей) и II — длительного предела выносливости. Для сталей $N_0 = 10^7$. При любом более высоком значении предела выносливости σ_i число циклов нагружения N_i сокращается.

Детали станков рассчитывают, учитывая длительный предел выносливости, и их выход из строя из-за поломки от появления усталостной трещины является недопустимым.

Сопротивление усталости поверхностных слоев деталей определяет работоспособность зубчатых колес, подшипников качения, кулачков, роликов и других деталей, работающих в условиях контактной нагрузки. Возникающие местные напряжения подсчитываются по формулам Герца, причем из геометрических параметров основное влияние на величину напряже-

ний оказывают радиусы кривизны сопряженных тел. Так, при начальном касании тел по линии (зубья колес, роликовые подшипники и направляющие, кулачковые механизмы и др.) наибольшее напряжение, возникающее в зоне контакта, подсчитывают (при коэффициенте Пуассона $\mu = 0,3$) по формуле

$$\sigma_{\max} = 0,418 \sqrt{\frac{QE}{b} \left(\frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2} \right)}, \quad (7)$$

где Q — нормальная нагрузка в зоне касания; $E = \frac{2E_1E_2}{E_1+E_2}$ — приведенный модуль упругости материалов сопряженных тел; b — ширина контакта; ρ_1, ρ_2 — радиусы кривизны сжимаемых тел, взятые со своим знаком (плюс для выпуклых поверхностей, минус для вогнутых).

Для изготовления деталей, работоспособность которых зависит от сопротивления усталости поверхностных слоев, применяют закаленные стали, кривая усталости которых не имеет прямолинейного участка (рис. 58,б), поэтому детали всегда имеют ограниченный срок службы.

База испытаний N_0 и соответствующий ей предел выносливости σ_{r0} носят условный характер.

Для большинства станков характерно постоянное изменение уровня нагрузок, действующих на основные звенья станка, так как технологический процесс и режимы обработки не остаются постоянными. Поэтому при расчетах на прочность необходимо учитывать суммарный эффект сопротивления усталости от действия различных

по величине и продолжительности нагрузок.

Рассмотрим наиболее простую схему суммирования напряжений для кривой усталости, изображенной в координатах: Q — нагрузка, N — число циклов нагружения (рис. 58,б). Суммирование можно производить исходя из оценки доли долговечности, затраченной при данной нагрузке. Если нагрузка Q_i действовала в течение N_i циклов, а N'_i — число циклов, при котором происходит разрушение от усталости, то отношение $\frac{N_i}{N'_i}$ представляет собой долю использованной деталью долговечности, поэтому

$$\sum \frac{N_i}{N'_i} = 1. \quad (8)$$

Уравнение кривой усталости для участка временного предела для большинства случаев имеет вид

$$N'_i Q_i^m = c = \text{const}, \quad (9)$$

где m — показатель степени. Для контактных напряжений $m=3$, для изгиба $m \approx 9$. Подставляя из уравнения (9) значения N'_i в формулу (6), получим

$$\sum \frac{N_i Q_i^m}{c} = 1 \quad \text{или} \quad \sum Q_i^m N_i = c. \quad (10)$$

Зададимся расчетным числом циклов N_p , которое деталь должна проработать за все время эксплуатации. Тогда можно определить расчетную нагрузку Q_p , которая заменит действие различных нагрузок равноценной.

Точка с координатами $Q_p - N_p$ также находится на кривой усталости, поэтому

$$Q_p^m N_p = c. \quad (11)$$

Приравняв левые части уравнений (10) и (11), получим

$$Q_p = \sqrt[m]{\sum \left(\frac{N_i}{N_p} \right) Q_i^m}. \quad (12)$$

Зная эту нагрузку, можно определить напряжения, возникшие в детали. Эти напряжения следует сравнивать с временным сопротивлением усталости σ_r , который соответствует числу циклов N_p . Однако в справочниках приведены значения длительного предела

выносливости σ_{r0} , соответствующие базовому числу циклов N_0 , а не значения σ_r .

Заменим нагрузку Q_p , действующую в течение числа циклов N_p , эквивалентной ей по усталостному эффекту нагрузкой Q_{p0} , которая действовала бы на базовое число циклов N_0 . Так как точки $Q_p - N_p$ и $Q_{p0} - N_0$ лежат на одной кривой выносливости (рис. 58,б), то $Q_p^m N_p = Q_{p0}^m N_0$. Откуда с учетом формулы (10) получим

$$Q_{p0} = Q_p \sqrt[m]{\frac{N_p}{N_0}} = \sqrt[m]{\sum \frac{N_i}{N_0} Q_i^m}. \quad (13)$$

При расчете по формуле (13) следует оценить типичные виды нагружения детали и длительность работы на них.

Для универсальных станков исходным материалом могут послужить статистические данные по загрузке станка, работающего в определенных условиях эксплуатации [11, 38].

При определении размеров детали под действием нагрузки Q_{p0} необходимо использовать значения длительного предела выносливости, хотя на самом деле деталь работает в зоне временного предела выносливости и обладает ограниченным сроком службы T . Срок службы определяется расчетным числом циклов N_p . Этот срок службы должен быть таков, чтобы деталь не выходила из строя в течение заданного периода эксплуатации станка.

Статическая жесткость станков. Деформации элементов станка, возникающие под действием силы резания, приводят к изменению относительного положения инструмента и обрабатываемой детали, т. е. к потере станком точности. Во многих случаях эти деформации играют решающую роль в общем балансе точности станка. Жесткостью узла называется его способность сопротивляться появлению упругих отжатий (деформаций)

$$j = \frac{P}{\delta}, \quad (14)$$

где P — сила, Н; δ — отжатие, мкм.

При этом применяются два основных способа измерения и подсчета жесткости узлов — когда деформация измеряется в направлении действия силы, и когда деформация измеряется

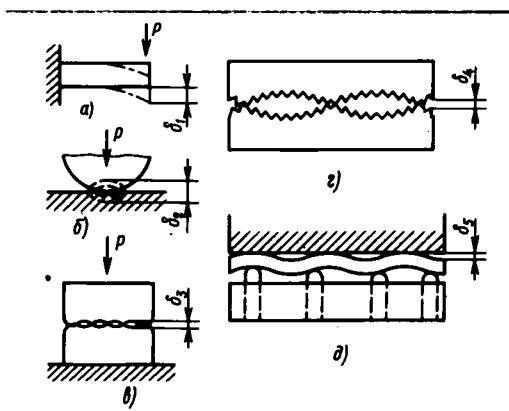


Рис. 59. Источники статических деформаций элементов станка

в том направлении, которое оказывает наибольшее влияние на точность обработки и не совпадает с направлением действия силы. Можно указать следующие основные источники деформации узлов и элементов станка (рис. 59).

Деформация тела детали δ_1 (рис. 59,а) — шпинделя, станины, деталей суппорта и т. д., которая может быть подсчитана с требуемой степенью точности по формулам сопротивления материалов. Трудность расчета в ряде случаев возникает в результате сложности конструктивных форм деталей (например, станины) или неопределенности характера закрепления (опоры шпинделя).

Контактная деформация (начальное касание деталей происходит по линии или в точке) характерна для подшипников качения, кулачковых механизмов, направляющих качения и др. Величину контактной деформации δ_2 (рис. 59,б) можно определить по формулам Беляева. Контактная деформация часто играет большую роль, чем деформация тела детали.

Деформация стыков — направляющих скольжения и неподвижных соединений — происходит вследствие деформации тех неровностей, которые присущи любой реальной поверхности и зависят от метода ее обработки. Еще в 30-х годах инж. К. В. Вотинов, который впервые проводил исследования жесткости станков, отметил, что для суппорта токарного станка деформация его деталей составляет всего

0,1—0,2% от общей деформации. Главную роль в этом случае играют деформации стыков. При контактировании небольших участков поверхностей на деформацию стыка δ_3 (рис. 59,в) влияет в основном шероховатость поверхности, так как в соприкосновении входит большое число микровыступов каждой детали. Исследования показали, что между удельным давлением и деформациями обычно существует степенная зависимость

$$\delta = k p^m. \quad (15)$$

Значения коэффициента k и показателя степени m зависят от метода обработки поверхности и для диапазона удельных давлений $p = 10 \div 50 \text{ Н/см}^2$ при измерении δ (в мкм) имеют следующие значения: для грубо шабренных поверхностей $k = 0,5 \div 0,65$, $m = 0,5$; при обычном шабрении $k = 0,25 \div 0,3$, $m = 0,5$; при финишном строгании и шлифовании $k = 0,15 \div 0,2$, $m = 0,4 \div 0,5$.

Измерение жесткости стыков различных элементов станка показывает, что с увеличением размера соприкасающихся поверхностей их деформация δ_4 растет (рис. 59,г). Это связано с влиянием волнистости поверхностей, которая приводит к возникновению пятен контакта и, следовательно, к концентрации больших удельных давлений в этих зонах.

Деформация планок δ_5 (рис. 59,д). Планки, клинья и другие регулировочные элементы, выполненные в виде тонких тел, имеют повышенную деформацию (до 3 раз) по сравнению с обычными стыками. Часто при действии нагрузок происходят как бы «распрямление» планки и деформация ее тела. Таким образом, жесткость всего узла станка зависит от различных по характеру деформаций его элементов, и наиболее достоверные данные будут получены при экспериментальной оценке жесткости.

Для измерения жесткости используют специальные приборы, которые состоят из динамометра для создания и измерения сил, действующих на узел, и приборов, регистрирующих деформации (индикаторы, датчики).

Схема установки для измерения статической жесткости элементов станка,

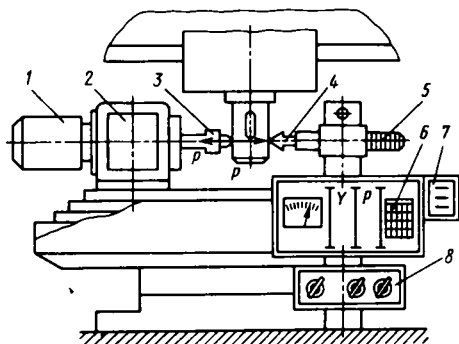


Рис. 60. Схема установки для измерения статической жесткости узлов станка

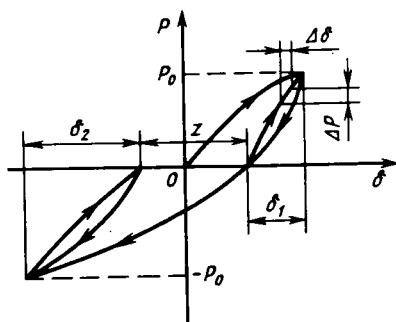


Рис. 61. Кривая жесткости

например для системы шпиндель—стол, показана на рис. 60. Нагрузочное устройство состоит из электродвигателя 1, редуктора 2 и датчика сил 3, дающего сигнал о величине создаваемой силы. Устройство закрепляют на столе станка, а его динамометрическая часть с датчиком сил 3 упирается в шпиндель. Поэтому между станком и шпинделем создается сила P , которая деформирует систему шпиндель — стол. Величину силы устанавливают, включая электродвигатель 1 с переносного 7 или стационарного 8 пультов управления. Если датчик перемещений 4 установлен на столе, а его наконечник упирается в шпиндель, то измеряют взаимное перемещение стола относительно шпинделя Y , т. е. может быть определена жесткость всей системы. При использовании высокочувствительного датчика перемещений, например емкостного, устанавливают специальный механизм микроподачи 5 в начальное положение.

В электронном измерительном блоке 6 регистрируются значения сил и соответствующих им перемещений. Возможно непосредственное получение на экране осциллографа кривой жесткости. Если датчик перемещений 4 установить на неподвижной стойке независимо от станка и упереть его наконечник в шпиндель или стол станка, то можно измерить их жесткость. Применяют также такие методы нагружения, при которых направление силы P совпадает с направлением

силы резания и не совпадает с направлением измеряемых деформаций.

Жесткость определяют как отношение силы, действующей на элемент станка, к величине его отжатия, вызванного этой силой. В результате испытаний обычно строят кривую жесткости в координатах нагрузка—деформация (рис. 61).

При нагружении до выбранного значения силы (например, P_0) и последующей разгрузке (до $P_0=0$) узел станка (например, суппорт) не возвращается в исходное положение, если в сопряжениях имелись зазоры, которые оказались односторонне выбранными. При последующих нагружениях кривые нагрузки и разгрузки не совпадают, образуя петлю гистерезиса, площадь которой характеризует работу сил трения в стыках.

Кривая жесткости в общем случае не является прямой, т. е. жесткость переменна и характеризуется для каждого участка тангенсом угла наклона кривой. Общую жесткость характеризует отношение

$$j_1 = \frac{P_0}{\delta_1}; \quad (16)$$

где $\pm P_0$ — наибольшая нагрузка в прямом и обратном направлении; δ_1 — упругое отжатие.

При нагружении в обратном направлении получим аналогичную картину, однако жесткость может иметь и другое значение: $j_2 < j_1$, так как $\delta_2 > \delta_1$ из-за наличия податливых клиньев и планок.

Отрезок z характеризует суммарные зазоры, его называют разрывом характеристики.

Жесткость основных элементов станков может иметь значения от 10^4 (суппорты) до $3 \cdot 10^5$ (шпиндели) Н/мм. Жесткость станин, приведенная к перемещению инструмента, очень велика и выражается сотнями Н/мм. Жесткость изменяется при изменении нагрузки. Поэтому можно говорить о мгновенной жесткости:

$$j_t = \frac{\Delta P}{\Delta \delta},$$

где ΔP и $\Delta \delta$ — приращение нагрузки и соответствующее изменение отжатия.

Для оценки той доли деформации, которая приходится на отдельные элементы станка, и выявления слабых звеньев строят график баланса жесткости станка, когда все деформации относят к взаимному перемещению инструмента и заготовки.

Мероприятия по повышению жесткости станков связаны с созданием таких конструкций, которые могли бы воспринимать большие силы обработки при малой деформации элементов станков. К таким мероприятиям относят повышение качества поверхности сопряжений и качества сборки; уменьшение числа стыков и длины кинематических цепей; повышение жесткости слабых звеньев (клиньев, рычагов, цанг и др.); создание рамных конструкций станка; применение предварительной нагрузки в сопряжениях; рациональное распределение нагрузок.

Деформация элементов станка отражается в первую очередь на точности обработки. Для определения допустимых значений деформаций необходимо рассчитывать те погрешности обработки, которые они вызывают. Учет деформаций самой обрабатываемой детали и приспособлений рассматривается в курсе «Технология машиностроения».

В зависимости от конструкции станка и метода обработки недостаточная жесткость элементов станка может по-разному влиять на точность обработки. В одних случаях возникающие деформации непосредственно искажают размеры и форму обрабатываемой детали, в других — это влияние можно

значительно уменьшить или почти исключить подналадкой станка. Часто происходит перераспределение сил, действующих в процессе обработки, что во многих случаях приводит к изменению положения механизма и, следовательно, к возникновению таких погрешностей обработки, которые трудно устранить подналадкой.

Например, при обточке детали в центрах токарного станка сила резания приложена около задней бабки. При обточке деталей резец приближается к передней бабке станка, и составляющая, действующая на шпиндель, возрастает. В результате будут изменяться деформации шпинделя, передней и задней бабок станка, а следовательно, и положение обрабатываемой детали.

§ 3. Стойкость станка к действию вредных процессов

Вибростойкость (динамическое качество) станка. Возникновение в станках быстротекущих колебательных процессов (вибраций) отрицательно сказывается на точности и качестве поверхности обрабатываемых деталей, а также нередко уменьшает долговечность станка и снижает его технологические возможности. Поэтому повышение показателей динамического качества станков весьма актуально.

Явления вибраций станков сложны и разнообразны, и их изучению посвящен раздел 3.

Рассмотрим основные причины, вызывающие колебания в станках, и соответственно виды колебательных процессов (рис. 62).

Вынужденные колебания происходят под действием внешней периодической возмущающей силы, возникшей, например, из-за прерывистости процесса резания (рис. 62,а), дисбаланса вращающихся деталей (ротора, электродвигателя, шпинделя с заготовкой) (рис. 62,б), ошибок в передачах, особенно в зубчатых, когда вход в зацепление каждого зуба сопровождается ударом. Колебания могут передаваться также извне от других станков или машин.

Интенсивность колебаний, вызванных возмущающей силой, зависит не

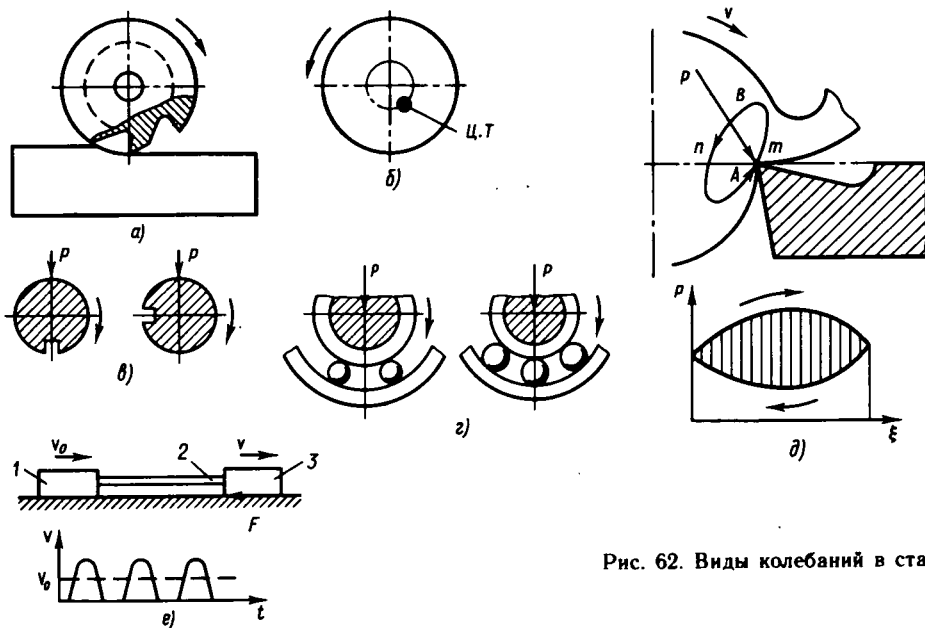


Рис. 62. Виды колебаний в станках

только от ее величины, но и от степени совпадения ее частоты с частотой собственных колебаний деталей станка, т. е. от явления резонанса. Поскольку каждый станок имеет большое число деталей, возможны более интенсивные колебания тех или иных элементов с разными частотами в зависимости от их попадания в зону резонанса.

Устранение причин, вызывающих колебания, связано в первую очередь с уменьшением величин возмущающих сил (балансировка деталей, повышение точности передач), а также с повышением жесткости станков.

Параметрические колебания возникают при наличии какого-либо переменного параметра, создающего эффект, аналогичный действию переменной силы. Обычно таким параметром является переменная жесткость детали или механизма. Например, наличие шпоночной канавки на валу (рис. 62, в) или переменная жесткость подшипников качения (рис. 62, г) приведет к тому, что при вращении вала при постоянной внешней силе P прогибы вала будут периодически меняться. Колебания, возникающие из-за переменной жесткости, по своему характеру и методам борьбы с ними близки к вынужденным.

Автоколебания при резании являются наиболее характерной формой колебательных процессов в станках. Автоколебания (незатухающие, самоподдерживающиеся колебания) характеризуются тем, что силы, поддерживающие колебания системы, возникают в самом процессе колебаний. Существует целый ряд теорий, объясняющих происхождение сил, поддерживающих автоколебательный процесс. Так, согласно так называемой теории координатной связи траектория движения резца относительно заготовки имеет форму эллипса (рис. 62, д). На участке движения резца BnA сила резания P производит положительную работу, так как ее направление почти совпадает с направлением движения резца, а на пути AmB — отрицательную работу. Так как на пути BnA сила резания в среднем больше, чем на пути AmB из-за большей глубины резания, то в течение одного полного цикла колебания эта сила совершит некоторую положительную работу, поддерживающую колебательный процесс. Эта работа характеризуется площадью диаграммы силы резания P — перемещение резца ξ (рис. 62, д). Если система станка устойчива, то фазовый сдвиг между колебаниями резца в радиальном и тангенциальном направлениях

таков, что движение вершины резца по эллипсу будет происходить в направлении обратном, показанному на рис. 62,д. В этом случае силы резания будут оказывать демпфирующее действие на колебания, и площадь эллипса будет характеризовать величину рассеиваемой энергии.

Описанная роль изменения толщины среза в возбуждении автоколебаний дополняется эффектом запаздывания изменения силы резания при изменении толщины среза.

Автоколебания возникают обычно с частотой, близкой к частоте собственных колебаний деталей. Поэтому в станках наблюдаются высокочастотные колебания, соответствующие частоте собственных колебаний резца ($f = 2000 \div 6000$ Гц), колебания средней частоты, соответствующие частоте собственных колебаний шпинделя ($f = 200 \div 300$ Гц), и низкочастотные колебания суппортной группы ($f = 80 \div 150$ Гц) или обрабатываемой детали.

Фрикционные автоколебания, причина которых заключается в переменности сил трения в направляющих элементах, могут возникать при перемещении столов, суппортов и других элементов станка. Одной из причин возникновения фрикционных автоколебаний является то, что сила трения покоя F_0 больше силы трения движения F , и зависит от продолжительности неподвижного контакта. Эти явления способствуют возникновению релаксационных (прерывистых) автоколебаний при медленных перемещениях элементов станка (рис. 62,е). При малой равномерной скорости перемещения v_0 ведущего звена 1 будет происходить деформация передаточного механизма (звена 2) и движение ведомого звена 3 начнется лишь тогда, когда будет преодолена сила сопротивления F_0 . Как только начнется движение, сила трения резко уменьшится, так как $F < F_0$, и ведомое звено под действием потенциальной энергии сжатого звена 2 получит перемещение с переменной скоростью V и остановится. Далее циклы скачков будут повторяться во времени t . В случае смешанного трения возникновение фрикционных автоколебаний можно объяснить, если рассмотреть движение

элемента станка, имеющего не менее двух степеней свободы. Для создания станков высокого динамического качества необходимо рассмотреть динамическую систему всего станка и выявить основные факторы, влияющие на интенсивность колебательных процессов (см. раздел 3).

Теплостойкость станка. Тепловые деформации станков являются наиболее характерным процессом средней скорости, который приводит к нарушению начального положения элементов станка и понижает точность обработки. Так, например, наблюдения за положением шпинделя токарного станка показали, что при работе станка в течение нескольких часов (3—7 ч) происходит постепенное смещение шпинделя из-за нагрева передней части шпиндельной бабки. Смещение доходит до 20—120 мкм и затем прекращается, так как устанавливается определенный теплообмен. После выключения станка происходит постепенный возврат шпинделя в прежнее положение.

Наибольшее влияние на точность обработки оказывают тепловые деформации точных механизмов и корпусных деталей. Основными источниками тепловыделения в станках, приводящими к появлению неравномерных тепловых полей, являются процесс резания, трение в механизмах станка, гидросистемы, электротехнические системы (особенно двигатели). Кроме того, необходимо учитывать влияние внешних источников тепла и колебания температуры окружающей среды.

Во времени t тепловые деформации δ протекают обычно по экспоненциальному закону

$$\delta = c(1 - e^{-at}), \quad (17)$$

где c , a — коэффициенты, зависящие от конструкции и материала. С течением времени значение тепловых деформаций стабилизируется (теоретически при $t \rightarrow \infty$ значение $\delta \rightarrow c$), однако период их интенсивного проявления занимает, как правило, несколько часов. Результаты исследования тепловых деформаций вертикально-фрезерного станка с ЧПУ показаны на

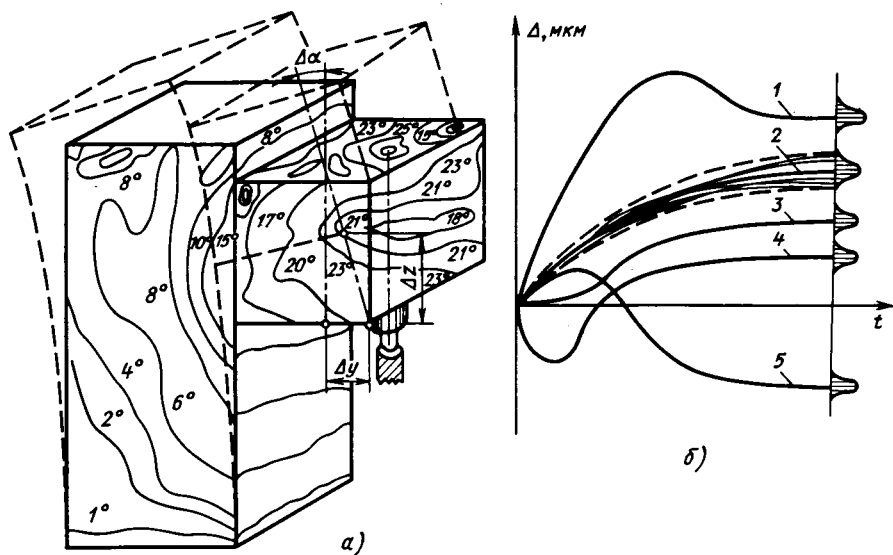


Рис. 63. Тепловые деформации и температурные поля вертикально-фрезерного станка

рис. 63. Неравномерный нагрев конструкции (на рис. 63,а показаны изотермы и значения избыточных температур стенок стойки и шпиндельной бабки станка) приводит к тепловым деформациям. Шпиндель из-за термосимметричности конструкции изменяет свое положение в плоскости, что характеризуется смещениями Δy и Δz переднего конца шпинделя и поворотом его оси на угол $\Delta \alpha$. В данном случае смещения являются результатом двух процессов, протекающих во времени с неодинаковой интенсивностью, — тепловых деформаций шпиндельной бабки и колонны станка, которая может изгибаться и вперед, и назад. Поэтому суммарная деформация Δ (рис. 63,б) может подчиняться не только экспоненциальному закону (кривая 2), но иметь более сложную зависимость с наличием максимума (кривые 1, 5), минимума (кривая 4), может возрастать во времени t с различной интенсивностью (кривая 3) и в ряде случаев возможно изменение направления деформации (кривые 4, 5). Однако во всех случаях через 3—5 ч работы станка происходит стабилизация его тепловых деформаций.

Следует иметь в виду, что тепловые деформации, как и другие процессы, изменяющие начальное состоя-

ние станка, проявляются как случайные функции (кривая 2).

Влияние тепловых деформаций станков на точность обработки может быть снижено следующими основными способами: уменьшением теплообразования и увеличением теплоотдачи; расположением источников тепла (например, гидростанций) вне станка; выравниванием температурного поля станин и стоек искусственным подогревом более холодных стенок; введением температурных компенсаторов; созданием цехов с постоянной температурой (термоконстантных); созданием автоматических систем с обратной связью, восстанавливающих координаты станка за счет специального подогрева или охлаждения отдельных частей корпусных деталей.

Износостойкость станка. Для станков, как и для многих других машин, основным из медленно протекающих процессов является изнашивание. Износ — это результат процесса постепенного изменения размеров детали по ее поверхности при трении.

При изнашивании двух сопряженных деталей на их поверхностях возникают сложные процессы, обусловленные микрорезанием, пластическим деформированием, усталостными явлениями, окислительными процессами, темпера-

турными влияниями и т. д. Кроме износа для поверхностей деталей станков характерны такие виды разрушения, как смятие, усталость поверхностных слоев. Износу подвергаются многие сопряжения станков — направляющие, ходовые винты, диски фрикционных муфт, шпиндельные опоры и др. Износ приводит к потере станком точности, к росту динамических нагрузок, падению КПД, увеличению тепловыделения и к другим явлениям, ухудшающим начальные показатели. Основные методы борьбы с износом: применение износостойких материалов, смазки поверхностей, предотвращение загрязнения поверхностей, выбор рациональных конструктивных форм, сопряжений, компенсация износа и др. (см. гл. 19). Смазка трущихся поверхностей станков является одним из основных методов повышения их долго-

вечности и увеличения КПД станка, а также уменьшения шума и вибраций.

Большинство сопряжений станков работает в условиях неполной смазки, когда между поверхностями возникает граничное трение (толщина слоя смазки порядка 0,1 мкм) или полужидкостное трение. В этом случае износ поверхностей значительно меньше, чем при отсутствии смазки, но полностью устранить износ нельзя, так как может возникнуть непосредственный контакт трущихся тел.

При расчете и конструировании станка необходимо обеспечить как его высокие начальные показатели: прочность, точность, жесткость, так и сопротивляемость вредным процессам, действующим на станок при его эксплуатации, т. е. высокие вибро-, тепло- и износостойкость.

Глава 9 Привод станков

§ 1. Структура привода со ступенчатым регулированием

Привод станка сообщает инструменту и заготовке необходимые скорости и передает силы, требуемые для осуществления данного технологического процесса. Привод станка состоит из коробки скоростей, осуществляющей главное движение, коробок подач и привода вспомогательных и установочных перемещений.

Коробки скоростей и подач должны иметь звенья настройки для получения различных режимов обработки в заданном диапазоне. Регулирование скоростей и подач может быть ступенчатым или бесступенчатым. Бесступенчатое регулирование — это регулирование, когда в данном диапазоне можно установить любую скорость или подачу. Применение гидравлических методов бесступенчатого регулирования, как правило, более целесообразно для поступательного привода (см. гл. 25). Механические вариаторы скоростей обычно сложны и не всегда обеспечивают передачу требуемой мощности и высокий КПД.

В станкостроении все шире применяют регулируемые электродвигатели постоянного тока с большим диапазоном регулирования. Однако чаще применяют асинхронные электродвигатели с одной или несколькими (двумя или тремя) скоростями. В этом случае применяют ступенчатое регулирование, которое дает возможность установить лишь определенные частоты вращения в заданном диапазоне, и поэтому скорость резания или подача не всегда могут быть установленны точно.

Передачи со ступенчатым регулированием обычно компактны и просты, имеют высокий КПД. Кинематические возможности привода можно оценить диапазоном регулирования, который показывает соотношение максимальных и минимальных частот вращения шпинделя n или подач s :

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \text{ или } D_1 = \frac{s_{\max}}{s_{\min}}. \quad (18)$$

Значение D выбирается в зависимости от размеров обрабатываемых деталей и применяемых режимов резания.

При главном вращательном движении частота вращения шпинделя связана со скоростью резания v (м/мин), диаметром обрабатываемой детали d (мм):

$$n_{\text{ш}} = \frac{1000v}{\pi d}. \quad (19)$$

Для современных универсальных станков диапазоны регулирования главного движения находятся в пределах 10—200.

При ступенчатом регулировании в диапазоне $n_{\text{min}} - n_{\text{max}}$ должен быть обеспечен ряд скоростей $n_1; n_2; \dots n_z$. Число частот вращения z в современных коробках скоростей обычно $z = 18 \div 36$, а число подач значительно выше.

В коробках скоростей и подач, когда не требуется обеспечение точного передаточного отношения, наиболее целесообразно применять геометрический ряд частот вращения. Это было впервые обосновано в 1876 г. русским академиком А. В. Гадолиным.

Основные зависимости геометрического ряда (геометрической прогрессии) со знаменателем φ : члены ряда $n_1; n_2 = n_1\varphi; \dots n_k = n_{k-1}\varphi = n_1\varphi^{k-1}$; максимальная частота вращения $n_z = n_1\varphi^{z-1}$; диапазон регулирования $D = \frac{n_z}{n_1} = \varphi^{z-1}$; знаменатель геометрического ряда $\varphi = \sqrt[z-1]{D}$; число скоростей

$$z = \frac{\lg D}{\lg \varphi} + 1. \quad (20)$$

Для геометрического ряда при данном φ постоянен перепад скоростей A :

$$A = \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1}} = \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) 100 \% = \text{const.}$$

Перепад скоростей показывает возможный процент потери скорости резания по отношению к требуемой из-за применения ступенчатого регулирования. Геометрический ряд удобен не только тем, что обеспечивает постоянный перепад скоростей, но и тем, что на его основе можно проектировать сложные коробки скоростей и подач, состоящие из промежуточных двухваловых передач, также построенных по геометрическому ряду.

У приводов со ступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя, числа двойных ходов и подачи построены по геометрическому ряду, а их

значения и знаменатель прогрессии стандартизированы, что значительно облегчает проектирование приводов.

В основу выбора стандартных значений знаменателя геометрической прогрессии $\varphi_{\text{ст}}$ положены следующие три основных принципа.

1. Принцип получения различных рядов из основного ряда со знаменателем φ_{min} . Если выбран ряд с некоторым наименьшим значением $\varphi = \varphi_{\text{min}}$, то все остальные ряды получаются из этого основного ряда, если брать его члены через один.

2. Принцип удешевления. Если в стандартном ряде частот вращения имеется член n_1 , то необходимо, чтобы через x ступеней встретился бы член $n_{x+1} = 10n_1$. Это условие позволит построить таблицы стандартных частот вращения в пределах 1—10 об/мин и, умножая их на 10, 100 и т. д., получить частоты вращения для других пределов. Из поставленного условия

$$\frac{n_{x+1}}{n_1} = 10, \text{ но } n_{x+1} = n_1\varphi^x,$$

поэтому

$$\varphi = \sqrt[x]{10}. \quad (21)$$

3. Принцип удвоения. Если в стандартном ряде имеется член n_1 , то необходимо, чтобы через y ступеней встретился член $n_{y+1} = 2n_1$. Этот принцип удобен как для построения таблиц, так и в случае применения в коробках скоростей двухскоростных (а иногда и многоскоростных) электродвигателей с отношением синхронных частот вращения, равном двум.

Аналогично предыдущему случаю получим

$$\varphi = \sqrt[y]{2}. \quad (22)$$

Так как желательно, чтобы оба последних принципа соблюдались одновременно, то $\varphi = \sqrt[x]{10} = \sqrt[y]{2}$ или $\frac{1}{x} \lg 10 = \frac{1}{y} \lg 2$, откуда $y = x \lg 2 = x \cdot 0,30103 \approx 0,3x$. Для стандартного знаменателя исходного ряда принято $x = 40$ и $y = 12$, т. е. $\varphi_{\text{min}} = 1,06 = \sqrt[40]{10} = \sqrt[12]{2}$. Знаменатели остальных рядов получают из φ_{min} возведением его в степень n .

Таблица 4

Стандартные знаменатели рядов и их параметры при ступенчатом регулировании

$\Phi_{ст}$	n	x	y	$A \text{ } 100 \%$
1,06	1	40	12	5
1,12	2	20	6	10
1,26 1,25	4	10	3	20
(1,41) 1,4	6	(6,66)	2	30
1,58 $\approx$ 1,6	8	5	(1,5)	40
(1,78)	10	4	(1,2)	45
(2)	12	(3,33)	1	50

Обозначения. n — показатель степени в формуле $\Phi_{ст} = (1,06)^n$; x , y — показатели степени в формулах (21), (22); A — перепад скоростей.

Примечание. Стандартные знаменатели можно округлять соответственно до значений 1,25; 1,4; 1,6. в скобки взяты знаменатели, не удовлетворяющие первому принципу, применение которых менее желательно; принципу удешевления и удвоения не удовлетворяют те ряды, у которых x и y не являются целыми числами; $\Phi = 1,06$ — имеет вспомогательное значение, в станках практически не применяется; $\Phi = 1,12$ применяются в автоматах и тяжелых станках, где требуется более точная настройка на заданный режим; $\Phi = 1,26$ и 1,41 — наиболее часто применяемые знаменатели для рядов универсальных станков (токарных, фрезерных, расточных и др.); $\Phi = 1,58$ и 1,78 применяются в станках, где вспомогательное время велико и поэтому нет необходимости точно устанавливать режим обработки; $\Phi = 2$ имеет вспомогательное значение при расчете промежуточных передач, так его применение приведет к возможности лишь приблизительной настройки на заданный режим ($A = 50 \%$).

Стандартные знаменатели геометрических рядов приведены в табл. 4.

В станкостроении стандартизованы также частоты вращения. Так как ряды частот вращения целесообразно начинать с $n_1 = 1$ об/мин, то все остальные значения частот вращения кратны знаменателю прогрессии Φ , так как для любого k -го члена $n_k = n_1 \Phi^{k-1} = \Phi^{k-1}$. В станкостроении принято, что выбранная частота вращения не должна отклоняться от стандартной более чем на $\pm 10(\Phi - 1) \%$.

§ 2. Графоаналитический метод кинематического расчета приводов со ступенчатым регулированием

Для облегчения кинематических расчетов сложных коробок скоростей и подач применяют графоаналитический метод, который заключается в графическом изображении частот вращения и передаточных отношений в виде так называемых графиков частот вращения и структурных сеток.

Передаточным отношением U называется отношение частот вращения ведомого вала к ведущему: $U = \frac{n_{вед}}{n_0}$.

При $U > 1$ передача будет ускорительной, при $U < 1$ — замедлительной. Если ведущий вал имеет некоторую постоянную частоту вращения $n_0 = \text{const}$, а частоты вращения ведомого вала составляют геометрический ряд со знаменателем Φ , то

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{n_2}{n_3} = \dots = \frac{n_{z-1}}{n_z} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_2}{U_3} = \dots = \frac{U_{z-1}}{U_z} = \frac{1}{\Phi}.$$

Это выражение показывает, что если частоты вращения ведомого вала составляют геометрическую прогрессию со знаменателем Φ , то передаточные отношения, необходимые для получения этих частот вращения, также будут составлять геометрический ряд с тем же знаменателем.

Для удобства расчетов передаточные отношения передач выбираются равными или кратными значениям стандартных знаменателей $U = \Phi^k$ (где k — целое число), например $U = 1,06; 1,41; 2; 2,51$ и т. д.

График частот вращения для коробки скоростей, состоящей из двух промежуточных двухваловых передач, обеспечивающих $z = 3 \times 2 = 6$ скоростей, показан на рис. 64.

При изображении графиков частот вращения принято следующее: 1) каждому валу коробки скоростей соответствует своя шкала частот вращения, на которой точками отмечают число частот вращения данного вала; 2) частоты вращения на каждой шкале изображают в логарифмическом масштабе, поэтому геометрический ряд частот вращения изображают в виде точек, расположенных на одинаковом расстоянии: точки, расположенные правее, соответствуют более высоким частотам вращения; расстояние между соседними частотами вращения равно Φ , так как $\Phi = \frac{n_{k+1}}{n_k}$, а в логарифмической шкале деление заменяют вычитанием; 3) передаточные отношения изображают линиями, соединяющими точки соответствующих частот вращения соседних валов.

Наклон линии характеризует величину передаточного отношения: вправо

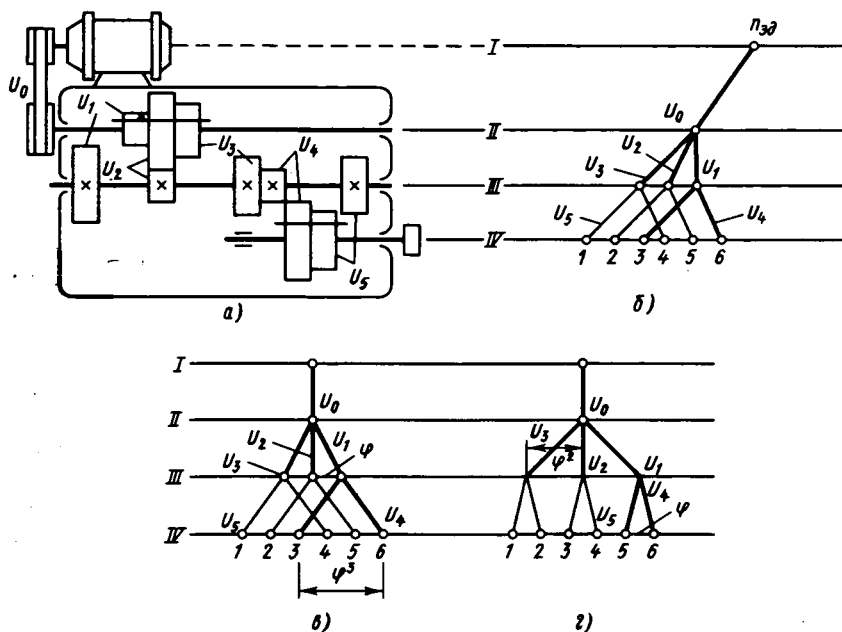


Рис. 64. Схема коробки скоростей (а), график частот вращения (б) и варианты структурных сеток (в)

ускорение ($U > 1$) и влево — замедление ($U < 1$). Параллельные линии означают одинаковое передаточное отношение.

По графику частот вращения легко проследить, как получается требуемый геометрический ряд на шпинделе. От электродвигателя идет передача U_0 , дающая замедление валу II. Далее блок из трех шестерен сообщает три различных частоты вращения валу 3. Из графика видно, что передаточные отношения, обеспечивающие эти три скорости, будут: $U_1 = 1$; $U_2 = \frac{1}{\varphi}$; $U_3 = \frac{1}{\varphi^2}$.

Передача от вала III к валу IV коробки скоростей осуществляется двумя парами шестерен с передаточными отношениями U_4 и U_5 . На графике $U_4 = \varphi$ ускорительная передача. Эта передача может быть включена при любой частоте вращения вала III, что обозначено на графике параллельными линиями. Шпиндель получает частоты вращения n_4, n_5 и n_6 , вместе с которыми три другие частоты вращения n_1, n_2 и n_3 должны составлять геометрический ряд. Как видно из графика, для этого необходимо, чтобы $U_5 = \frac{1}{\varphi^2}$.

Для получения требуемого геометрического ряда частот вращения на шпин-

деле может быть осуществлено несколько вариантов графиков частот вращения с различными передаточными отношениями промежуточных пар зубчатых колес. Конструктор должен выбрать лучший вариант, который соответствует меньшим габаритным размерам и более благоприятным кинематическим и динамическим характеристикам. Для этого, вначале строят структурную сетку. Структурная сетка отличается от графика частот вращения тем, что она всегда симметрична.

По структурной сетке (рис. 64, в) можно установить только соотношение между передаточными числами, но не их величину: $U_1:U_2:U_3 = \varphi$ и $U_4:U_5 = \varphi^3$. Структурная сетка, которая дает менее полные кинематические характеристики коробки скоростей, нужна для того, чтобы сначала выбрать структурный вариант, а затем переходить к построению графиков частот вращения. Так, на рис. 64, г для той же коробки скоростей изображен другой вариант структурной сетки, также обеспечивающей геометрический ряд частот вращения на шпинделе. Однако передаточные отношения промежуточных двухваловых передач будут иметь другие значения: $U_1:U_2:U_3 = \varphi^2$ и $U_4:U_5 = \varphi$. Для построения структурных сеток

следует пользоваться следующими правилами.

1. Число структурных вариантов p равно числу перестановок промежуточных двухваловых передач n , входящих в коробку скоростей, т. е. $p=n!$. Например, при $z=3 \cdot 2=6$ $n=2$ и $p=2$; эти два варианта и показаны на рис. 64, а, а при $z=3 \cdot 2 \cdot 2=12$ $n=3$, т. е. $p=6$.

2. Для построения структурных вариантов необходимо все промежуточные передачи разделить на группы I, II, III и т. д.

Лучи группы I в структурной сетке расходятся на величину φ , лучи группы II расходятся на φ в степени числа лучей первой передачи z_1 , лучи группы III расходятся на φ в степени $(z_1 z_{11})$, где z_{11} — число лучей во второй передаче, и т. д.

Для наглядности это правило можно выразить таблицей 5.

Для пояснения этого правила рассмотрим построение структурных вариантов для коробки скоростей с $z=3 \cdot 2 \cdot 2=12$. Шесть структурных вариантов будут соответствовать различным случаям, когда промежуточным двухваловым передачам (рис. 65) последовательно присваивают номера групп I—III.

Таблица 5

Параметры структурных вариантов

Параметр	Группа			
	I	II	III	IV
Число лучей в группе	z_I	z_{II}	z_{III}	z_{IV}
Расхождение лучей	φ	φ^{z_I}	$\varphi^{z_I z_{II}}$	$\varphi^{z_I z_{II} z_{III}}$

Для коробок скоростей станков, где происходит уменьшение частот вращения от ведущего (приводного) вала к ведомому (шпинделю), чаще лучшим является первый вариант (с веерообразным графиком). При применении этого варианта в области высоких частот вращения работает большее число передач, так как главная редукция осуществляется на последней ступени. Скоростные зубчатые колеса имеют меньшие размеры, так как при данной мощности они будут передавать меньшие крутящие моменты. Поэтому веерообразный вариант будет соответствовать более компактной коробке скоростей. Кроме того, небольшие передаточные отношения в области высоких частот вращения работы обеспечивают лучшие условия для работы

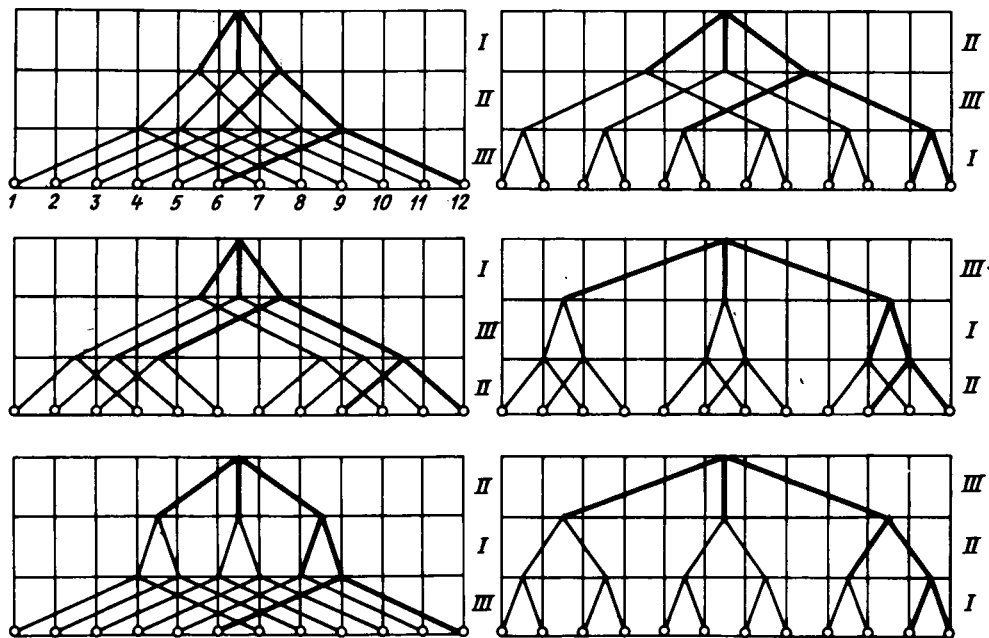


Рис. 65. Структурные варианты для передачи частот вращения для варианта $z=3 \times 2 \times 2=12$

зубчатых передач. По тем же соображениям при выборе порядка расположения множительных передач целесообразнее вначале иметь большую частоту вращения. Так, вариант $z=12=3 \cdot 2 \cdot 2$ лучше, чем $z=12=2 \cdot 2 \cdot 3$.

§ 3. Пример кинематического расчета коробки скоростей

В качестве примера применения графоаналитического метода произведен кинематический расчет коробки скоростей по следующим исходным данным: число скоростей шпинделя $z=16$; знаменатель ряда $\varphi=1,26$; минимальная частота вращения шпинделя $n_1=20$ об/мин; частота вращения электродвигателя $n_{эд}=960$ об/мин,

1-й этап — построение структурной сетки. Как было показано, лучшим вариантом будет $z=4 \cdot 2 \cdot 2$ с веерообразной структурой (рис. 66,а). Из структурной сетки получаем следующие соотношения для передаточных чисел:

$$U_1:U_2:U_3:U_4=\varphi=1,26, \quad U_5:U_6=\varphi^4=2,5, \\ U_7:U_8=\varphi^8=6,25. \quad (23)$$

2-й этап — построение графика частот вращения. Для построения графика необходимо в каждом из соотношений (23) выбрать одно передаточное число, тогда можно будет определить и все остальные значения. U выбирают так, чтобы его значения не выходили за допустимые пределы

$(\frac{1}{4} < U < 2)$. Наибольшее расхождение имеют лучи U_8 и U_7 . Если принять $U_7=1$, то $U_8=\frac{1}{6,25}$, что недопустимо. Поэтому выберем $U_7=\varphi^2=1,58$, тогда $U_8=\frac{1}{\varphi^8}=\frac{1}{4}$. (Принимаем также значения $U_7=\varphi^3=2$ и $U_8=\frac{1}{\varphi^5}=\frac{1}{3,16}$).

Для передачи с U_5 и U_6 можно принять $U_5=1$, тогда $U_6=\frac{1}{\varphi^4}=\frac{1}{2,5}$ находится в допустимых пределах, причем имеется запас редукции, но для того, чтобы ведущие передачи находились в области больших частот вращения, можно принять $U_5=\frac{1}{\varphi}=\frac{1}{1,26}$, тогда $U_6=\frac{1}{\varphi^5}=\frac{1}{3,16}$.

Для первой двухвальной передачи можно принять $U_1=1$, тогда $U_2=\frac{1}{\varphi}=\frac{1}{1,26}$; $U_3=\frac{1}{\varphi^2}=\frac{1}{1,58}$ и $U_4=\frac{1}{\varphi^3}=\frac{1}{2}$.

В соответствии с этими передаточными отношениями на рис. 66,б построен график частот вращения. Частота вращения приводного (2) вала соответствует $n=500$ об/мин шпинделя. Поэтому передаточное отношение ременной передачи электродвигателя к приводному валу коробки скоростей $U_0=\frac{500}{960} \approx \frac{1}{1,9}$.

3-й этап — определение чисел зубьев зубчатых колес. При определении чисел зубьев необходимо не только получить данное передаточное отношение $U=\frac{n_2}{n_1}=\frac{z_1}{z_2}$, но и обеспечить постоянную сумму зубьев в пределах двухвальной передачи: $\Sigma z=z_1+z_2=\text{const}$.

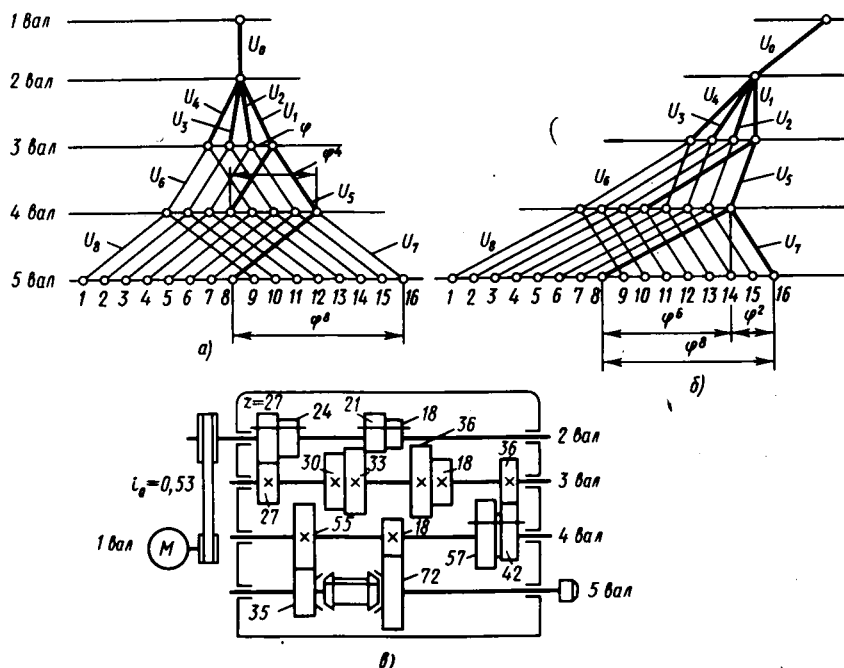


Рис. 66. Кинематический расчет коробки скоростей

Выбор числа зубьев передачи при заданном передаточном отношении

u	Σz														
	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
1.00	25		26		27		28		29		30		31		32
1.06							27		28		29		30		31
1.12		24		25		26		27		28			29		30
1.19	23					25		26		27				29	29
1.26	22		23		24		25			26		28			
1.33		22			23		24		25			27			
1.44		21		22		23			24		25			26	
1.50	20		21			22		23			24				
1.58			20		21			22		23	23		24		
1.68		19			20		21			22			23		24
1.78	18			19			20		21			22			23
1.88			18			19			20		21	21		22	22
2.00		17			18			19			20			21	
2.11	16			17			18			19			20		
2.24			16			17			18			19	19		
2.37		15			16			17				18			19
2.51				15			16				17			18	
2.66		14				15			16	16			17		
2.82												16			
2.99			13				14				15				16

Продолжение табл. 6

u	Σz														
	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
1.00		33		34		35		36		37		38		39	
1.06		32		33		34		35		36		37		38	
1.12		31		32		33		34		35		36	36	37	37
1.19		30		31		32		33		34	34	35	35		36
1.26	29	29		30		31		32		33	33		34		35
1.33	28			29		30		31			32		33		34
1.41	27		28	28		29		30	30		31		32		33
1.50	26		27	28		28		29	29		30		31	32	
1.58	25		26			27		28	28		29		30	30	
1.68			25		26	26		27	27		28		29	29	
1.78			24		25	25		26			27			28	
1.88		23	23		24			25			26			27	
2.00		22			23			24			25			26	
2.11	21	21		22	22		23	23		24	24			25	
2.24	20			21			22	22		23	23		24	24	
2.37			20	20			21			22			23	23	
2.51		19	19			20	20		21	21			22	22	
2.66		18			19	19			20	20			21		
2.82	17			18	18			19	19			20	20		
2.99			17	17			18	18			19	19			20
3.16		16	16			17	17				18				19
3.35					16	16				17				18	18
3.55									16	16			17	17	
3.76								15	15			16	16		

U	Σz														
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
1,00	40		41		42		43		44		45		46		47
1,06	39		40	40	41		42	42	43	43	44	44	45	45	46
1,12	38	38	39		40			41		42		43	43	44	44
1,19		37	38		39		39	40	40	41	41		42		43
1,26		36	37	37			38		39		40	40	41	41	
1,33	34	35	35		36		37	37	38	38		39		40	40
1,41	33	34			35	35		36		37	37	38	38		39
1,50	32		33	33		34		35	35		36		37	37	38
1,58	31		32	32		33	33		34		35	35		36	
1,68	30	30		31		32	32		33	33		34		35	35
1,78	29	29		30	30		31			32		33	33		34
1,88	28	28		29	29		30	30	31	31			32	32	
2,00		27			28		29	29		30	30		31	31	
2,11		26			27			28	28		29	29		30	30
2,24		25			26	26		27	27		28	28		29	29
2,37		24			25	25		26	26			27	27		28
2,51	23	23			24	24		25	25			26	26		27
2,66	22	22			23	23		24	24			25	25		
2,82	21	21			22			23	23			24	24		
2,99	20			21	21			22	22			23	23		
3,16	19			20	20			21	21			22	22		
3,35			19	19			20	20	20			21	21		
3,55		18	18	18			19	19			20	20	20		
3,76	17	17				18	18				19	19			
3,98	16	16			17	17				18	18	18			19

U	Σz													
	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,00		48	49	49	50	50	51	51	52	52	53	53	54	54
1,06	46	47	47		48		49		50		51		52	
1,12	45	45	46	46	47	47		48		49		50		51
1,19		44	44	45	45	46	46		47		48		49	49
1,26	42		43		44	44	45	46		46		47	47	48
1,33	41	41		42		43	43	44	44		45		46	46
1,41		40	40		41		42	42	43	43		44	44	45
1,50	38		39	39	40	40		41	41	42	42		43	43
1,58	37	37		38	38	39	39		40	40	41	41		42
1,68		36	36		37	37	38	38		39	39		40	40
1,78	34		35	35		36	36	37	37		38	38		39
1,88	33	33		34	34	35	35		36	36		37	37	
2,00	32	32		33	33		34	34		35	35		36	36
2,11		31	31		32	39		33	33		34	34		35
2,24			30	30		31	31		32	32		33	33	33
2,37	28		29	29			30	30		31	31		32	32
2,51	27			28	28		29	29			30	30		31
2,66	26	26		27	27			28	28		29	29	29	

U	Σz													
	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
2,82	25	25			26	26		27	27	27		28	28	28
2,99	24	24			25	25			26	26	25		27	27
3,16	23	23			24	24	24		25	25	24		26	26
3,35	22	22			23	23	23			24	23			25
3,55	21	21			22	22	22			23	22	23		24
3,76	20	20			21	21	21			22	21	22		23
3,98	19	19			20	20	20		21	21	20	21		22

Решая систему уравнений:

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = \Sigma z; \\ \frac{z_1}{z_2} = U, \end{cases} \quad (24)$$

получим $z_1 = \frac{U \Sigma z}{U + 1}$ и $z_2 = \frac{\Sigma z}{U + 1}$.

По этим формулам, задаваясь Σz и зная необходимые значения U , можно определить числа зубьев зубчатых колес. Однако передаточные числа являются, как правило, дробными, и поэтому z_1 и z_2 также получаются дробными. При их округлении до целых получим отклонение от заданных значений U , которые могут выйти за допустимые пределы. Кроме того, минимальное число зубьев силовых зубчатых колес коробок скоростей обычно должно быть не меньше $z_{\min} = 18 \div 20$.

Для облегчения расчетов приведена табл. 6 с указанием чисел зубьев меньшего зубчатого колеса. Пустые клетки означают, что при данном Σz передаточное отношение не может быть выдержано в требуемых пределах $\pm 10(\varphi - 1)\%$. Для определения чисел зубьев по табл. 6 находим такое значение Σz для каждой промежуточной двухваловой передачи, которое обеспечивает требуемые значения и имеет $z_{\min} > 18$. Результаты сводим в табл. 7.

Эти числа зубьев обозначены на схеме коробки скоростей рис. 66, а. Следует обратить внимание, что для замедлительных передач вначале идет шестерня с меньшим числом зубьев, а для ускорительных — с большим.

Далее производят силовые расчеты элементов коробок скоростей, определение модуля зубчатых передач, выбор подшипников, расчет диаметров

валов, размеров муфт и т. д. и окончательное конструктивное оформление коробки скоростей. Указания по силовым расчетам рассмотрены ниже.

§ 4. Основные типы коробок скоростей и подач

Конструктивное оформление и расположение коробок скоростей и подач на станке весьма разнообразно. В токарных, шлифовальных и других станках корпус коробки скоростей (подач) либо неподвижно закреплен на станине, либо может перемещаться по направляющим. В некоторых станках (например, расточных) весь привод объединен конструктивно в одном корпусе. С кинематической точки зрения, можно выделить следующие характерные типы коробок скоростей и подач.

Коробки скоростей и подач, построенные на основе множительных передач. Привод многих коробок скоростей и подач имеет структуру, построенную по тем классическим принципам, которые изложены выше. Примером конструктивного оформления таких коробок скоростей может служить развертка привода шпинделя для широкоуниверсального фрезерного станка мод. 6Р82Ш (рис. 67), обеспечивающего $z =$

Таблица 7

Пример определения числа зубьев зубчатых передач коробки скоростей (рис. 66)

Параметр	$U_1 = 1$	$U_2 = \frac{1}{1,26}$	$U_3 = \frac{1}{1,58}$	$U_4 = \frac{1}{2}$	$U_5 = \frac{1}{1,26}$	$U_6 = \frac{1}{3,16}$	$U_7 = 1,58$	$U_8 = \frac{1}{4}$
$z_1 : z_2$	27:27	24:30	21:33	18:36	33:42	18:57	55:35	18:72
Σz		54			75		90	

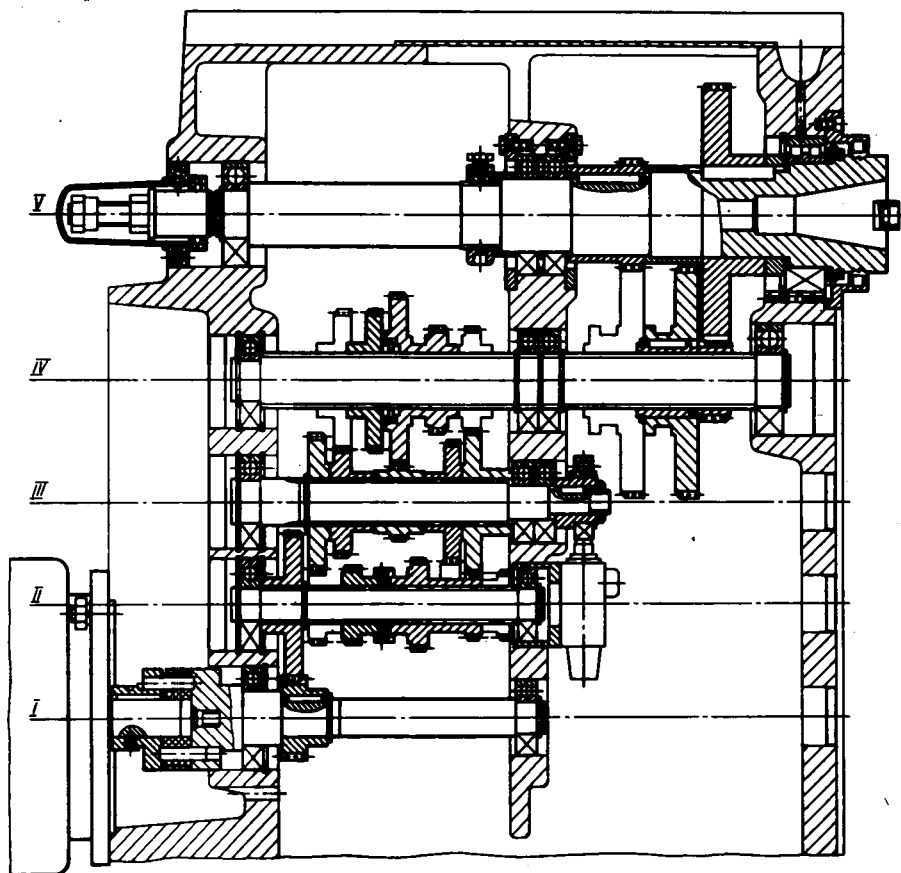


Рис. 67. Коробка скоростей широкоуниверсального фрезерного станка 6P82III

$= 3 \cdot 3 \cdot 2 = 18$ скоростей с $\phi = 1,26$ и частотами вращения шпинделя $n = 91,5 \div 1600$ об/мин. Однако при большом диапазоне регулирования могут встретиться затруднения, так как при веерообразной структуре расхождения лучей последней передачи настолько велико, что не может быть обеспечено одной парой зубчатых колес при нахождении передаточного отношения U в допустимых пределах. Например, в токарном станке 1Д63 коробка скоростей $\phi = 1,26$ имеет промежуточные передачи, которые могли бы обеспечить $z = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 24$ скорости. Но при веерообразном варианте структурной сетки последние лучи должны расходиться на $\phi^{2 \cdot 3 \cdot 2} = \phi^6 = 16$.

Это означает, что если при замедлении $U = \frac{1}{4}$, то при ускорении $U = 4$, что не может быть осуществлено одной па-

рой колес. Поэтому надо либо ввести дополнительную пару и, следовательно, усложнить коробку, либо уменьшить передаточное отношение и, следовательно, потерять несколько скоростей. В станке мод. 1Д63 был принят второй вариант: на последней ступени расхождения лучей взято $\phi^6 = 4$ вместо 16, в результате чего коробка имеет $z = 18$ скоростей и шесть скоростей перекрываются.

Передачи с составной структурой. Для увеличения диапазона регулирования сложных коробок скоростей целесообразно применять специальные структурные варианты. Составной структурой передач называется такая, которая состоит из двух или нескольких ветвей, каждая из которых построена на базе обычной множительной структуры. В приводе, состоящем из двух ветвей с числами скоростей со-

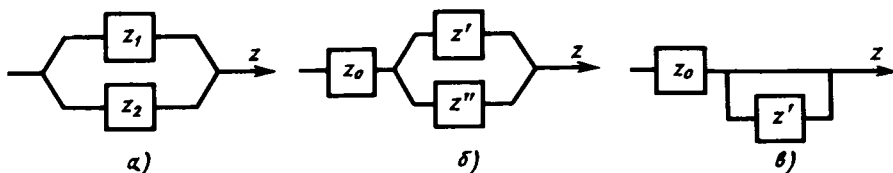


Рис. 68. Построение приводов с составной структурой

ответственно z_1 и z_2 . Общее число скоростей коробки с составной структурой (рис. 68, а)

$$z = z_1 + z_2. \quad (25)$$

Обычно у составных цепей имеется общая часть (рис. 68, б), которая имеет z_0 скоростей, т. е. $z_1 = z_0 z'$ и $z_2 = z_0 z''$, тогда $z = z_0 (z' + z'')$, если $z_2 = z_0$ (т. е. $z'' = 1$), то

$$z = z_0 (1 + z'). \quad (26)$$

В последнем случае (рис. 68, в) структура z_0 служит для получения всех скоростей и называется основной.

Составные структуры позволяют не только расширить диапазон регулирования коробки скоростей, но и повысить ее КПД, поскольку высшие частоты вращения шпинделя можно обеспечить более короткой кинематической цепью.

Коробки скоростей с перебором (рис. 69, а). Наиболее простой разновидностью коробок скоростей с составной структурой являются передачи с переборами, в которых одна скорость ведущего вала совпадает со скоростью

ведомого, а другая передается двумя парами зубчатых колес.

С вала 2 редуктора, работающего от электродвигателя 1, ведущий вал перебора 3 получает z_0 различных скоростей, которые либо непосредственно передаются на шпиндель 5 при включенной кулачковой муфте (U_1), либо через две пары колес перебора 4 (U_2). На рис. 69, б показан график частот вращения, из которого видно, что движение может миновать вал IV. Передаточное отношение перебора

$$U_{II} = U_1 U_2 = \frac{1}{\varphi^{z_0}}, \quad (27)$$

где z_0 — число скоростей ведущего вала перебора. Применяют также двойные переборы, в которых одна из пар перебора заменена двойным блоком зубчатых колес.

Привод с многоскоростными электродвигателями. Применение в приводе многоскоростных электродвигателей упрощает конструкцию коробки скоростей, облегчает включение скоростей. Чтобы при ступенчатом регулировании получить на шпинделе геометрический ряд частот вращения, скорости электродвигателя также должны располагаться по геометрическому ряду. Различные частоты вращения асинхронных электродвигателей получают путем переключения полюсов и, как правило, дают геометрический ряд с $\varphi = 2$ для двухскоростных электродвигателей (3000/1500 об/мин или 1500/750 об/мин). Поэтому необходимо выбирать такой структурный вариант, в котором расхождение лучей, характеризующих скорости электродвигателей, равно двум ($\varphi^k = 2$). В зависимости от заданного φ находят k .

Пример. Необходимо спроектировать коробку на $z = 12$ с $\varphi = 1,26$ и двухскоростным электродвигателем $n_{эд} = 3000/1500$. Шесть скоростей получаем за счет коробки с передвижными бло-

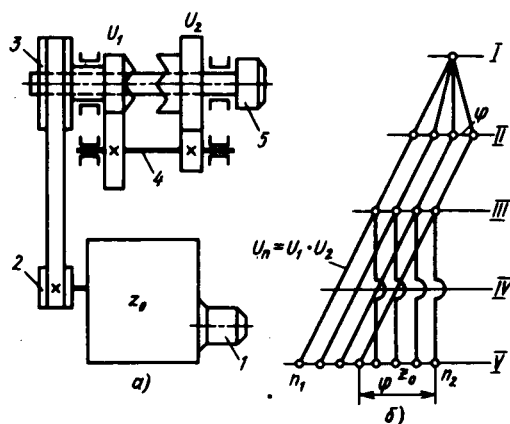


Рис. 69. Схема коробки скоростей с перебором

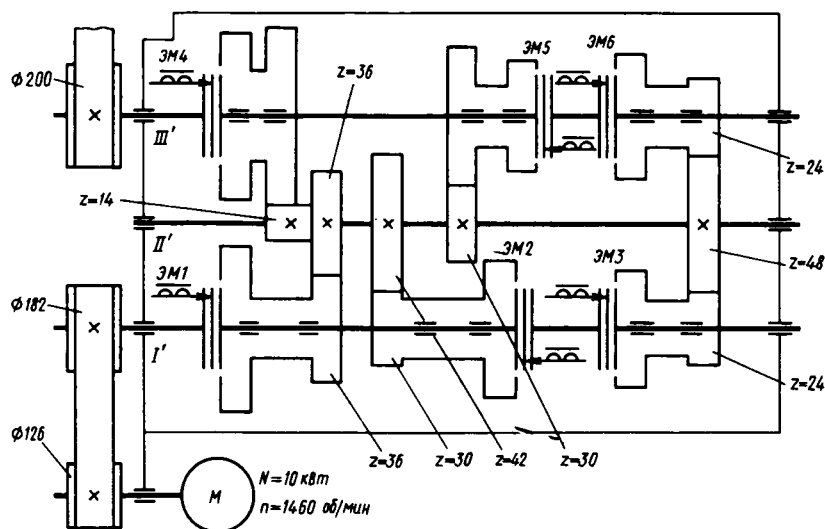


Рис. 70. Схема автоматической коробки скоростей

ками колес и две — переключением скоростей электродвигателя: $z=2 \times 3 \times 2=12$. Обычная веерообразная структура здесь не подходит, так как в этом случае скорости электродвигателей должны были бы иметь соотношение $\phi=1,26$. Вначале лучи расходятся на $\phi=(1,26)^3 \approx 2$, что удовлетворяет варианту $2 \times 3 \times 2$ (II, I, III). В этом случае не будет совпадения скоростей на отдельных ступенях.

Автоматические коробки скоростей (АКС) (рис. 70). Легкость управления и включения любой скорости на ходу достигается применением автоматических коробок скоростей, в которых использованы электромагнитные муфты ЭМ1 — ЭМ6. Часто АКС осуществляет лишь часть переключений; коробки устанавливают в сочетании с перебором или частью привода с обычными методами переключения скоростей. В современных станках стремятся сочетать АКС с тиристорным электродвигателем.

В отличие от коробок скоростей коробки подач во многих случаях должны обеспечить как требуемые режимы обработки, так и заданный ряд передаточных отношений, который зависит от схемы обработки (например, при нарезании резьб). Для коробок подач характерны также низкие скорости и небольшие передаваемые крутящие моменты. Поэтому в коробках подач применяют также механизмы, которые обеспечивают широкий ряд передаточ-

ных отношений, но из-за низкого КПД, малой жесткости, возможности передавать только небольшие скорости, как правило, не могут быть применены в быстроходных и нагруженных коробках скоростей. К таким передачам относятся конус с накидной шестерней, передачи типа Меандр [44] и др. (см. раздел I). При использовании передач с передвижными блоками зубчатых колес для обеспечения точного передаточного отношения часто применяют корректирование зубьев.

Пример. Передаточные отношения $U_1=1,2$ и $U_2=1,5$ можно осуществить двумя парами колес с числами зубьев $\frac{24}{20}$ ($\Sigma z=44$) и $\frac{27}{18}$ ($\Sigma z=45$). Но шестерню с $z=24$ нарезают, например, на заготовке, соответствующей шестерне с $z=25$, чтобы межцентровые расстояния у этих пар были одинаковы. Модуль скорректированного колеса увеличится на $\frac{25-24}{25} 100=4\%$.

Передачи с бесступенчатым регулированием. Для бесступенчатого регулирования в коробках скоростей и подач обычно применяют электродвигатели с регулируемой частотой вращения, которые сочетаются со ступенчатой коробкой передач, что расширяет диапазон регулирования станка.

При бесступенчатом регулировании не могут быть обеспечены точные передаточные отношения. Фрикционные вариаторы с бесступенчатым регули-

рованием используют в коробках подач с небольшими крутящими моментами и низкими частотами вращения. Для бесступенчатого регулирования в коробках скоростей, где требуется передача с постоянной мощностью (см. ниже), наиболее целесообразно применение комбинированного привода, состоящего из электродвигателя постоянного тока с диапазоном регулирования $D_{эд} = 3 \div 4$ и автоматической коробки передач на две-три скорости, которые включают с помощью электромагнитных многодисковых муфт. Это обеспечивает получение любой скорости во всем диапазоне регулирования, разбитом на поддиапазоны, внутри которых регулирование осуществляется электродвигателем.

§ 5. Особенности силовых расчетов коробок скоростей и подач

Выбор расчетных сил. Для расчета деталей, валов, подшипников, муфт необходимо в первую очередь определить действующие на них силы. Для коробок скоростей внешними силами являются силы резания P , приложенные к детали или инструменту, закрепленному в шпинделе, и силы на приводном шкиве Q или на роторе электродвигателя. Во время работы станка крутящий момент на приводном шкиве $M'_{кр}$ уравнивается крутящим моментом от сил резания $M_{кр}$ и моментами трения в кинематических парах $M_{тр}$:

$$M'_{кр} = U_0 M_{кр} + \sum_{k=1}^n M_{тр} U_k, \quad (28)$$

или

$$M'_{кр} = \frac{M_{кр}}{\eta} U_0,$$

где U_0 — общее передаточное отношение коробки скоростей; U_k — передаточное отношение от данной пары до шпинделя; η — КПД коробки скоростей.

Крутящий момент от сил резания

$$M_{кр} = P_z \frac{d}{2}. \quad (29)$$

Этот момент определяет эффективную мощность резания

$$N_{эф} = 2\pi M_{кр} n, \quad (30)$$

где P_z — тангенциальная составляющая сил резания; d — диаметр обрабатываемой детали; n — частота вращения шпинделя.

Привод подач, предназначенный для перемещения суппортов, столов, шпиндельных головок, преодолевает составляющую силы резания P_x и силы трения, возникающие в направляющих перемещаемого элемента станка. В некоторых случаях необходимо учитывать также силы инерции:

$$Q = P_x + f \sum R_i + ma, \quad (31)$$

где Q — сила тяги в коробке подач; P_x — составляющая силы резания в направлении подачи; R_i — реакции в направляющих; f — коэффициент трения в направляющих; ma — масса и ускорение перемещаемого элемента.

Реакции в направляющих возникают под действием сил резания и веса перемещающихся частей (стол с деталью, суппорт). Их определяют из расчетной схемы сил, действующих на суппорт (см. гл. 11). Возникающие в приводе внутренние силы и реакции в подшипниках являются производными внешних сил и образуют для каждого элемента систему сил, служащих для его расчета. Расчет сил резания производится по зависимостям теории резания металлов или определяется на основании экспериментальных данных.

Регулирование с постоянной мощностью и с постоянным моментом. При обработке на станке деталей различных размеров скорость резания v и сила резания P в первом приближении не связаны с диаметром обрабатываемой детали, так как эти параметры определяются характеристиками процесса резания. Поэтому при регулировании скоростей шпинделя должно соблюдаться условие $Pv = \text{const}$.

Это означает, что передаваемая мощность при включении разных чисел оборотов шпинделя должна быть одинаковой. Поэтому желательно (хотя и не всегда возможно), чтобы коробки скоростей обеспечивали в данном диапазоне регулирования передачу постоянной мощности при включении любой частоты вращения ведомого звена (шпинделя). Если $N = \text{const}$, то при

$n_1 = n_{\min}$ получим максимальный крутящий момент $M_{\max}$. При большом диапазоне регулирования D определение крутящего момента по минимальной частоте вращения шпинделя приведет к увеличению габаритных размеров привода, так как размеры зубчатых передач и других деталей непосредственно зависят от $M_{\text{кр}}$. Поэтому для определения крутящих моментов в коробках скоростей универсальных станков выбирают расчетную частоту вращения $n_p > n_{\min}$. Обычно на 1/3 или 1/4 нижних частот вращения допускают передачу с $M_{\text{кр}} = \text{const}$. В этом диапазоне частот вращения обработку ведут с заниженными режимами (силами) резания, которые ограничены прочностью или долговечностью деталей привода. На остальной части диапазона регулирование осуществляется с $N = \text{const}$. Например, если привод имеет $z = 24$, то можно принять за расчетную частоту вращения $n_p = n_8 = n_1 \varphi^7$.

При обработке деталей различных размеров величина подачи и передаточное отношение коробки подач, как правило, не связаны с размером (диаметром) обрабатываемой детали. Поэтому здесь производится регулирование с постоянным крутящим (вращающим) моментом $M_{\text{кр}} = \text{const}$.

Коэффициент полезного действия привода. КПД привода станка является его важной технической характеристикой, так как определяет ту долю энергии, которая затрачивается на полезную работу, т. е. непосредственно на процесс резания.

Для обработки детали необходима мощность N_s (эффективная мощность резания)

$$N_s = \frac{P_z v}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_x s}{60 \cdot 10^4}, \quad (32)$$

где P_z — тангенциальная составляющая силы резания; P_x — осевая составляющая резания (по подаче), Н; v — скорость резания, м/мин; s — подача, мм/мин.

Мощность, затрачиваемая на подачу столов и суппортов, обычно невелика и в случае передачи движения от общего электродвигателя затраты мощности в цепи подач могут быть оценены в универсальных станках в 2—3%. Полная мощность N , которая расходуется на процесс обработки, будет больше,

чем N_s , так как в приводе преодолеваются различные вредные сопротивления, в первую очередь трение. Если мощность, идущая на преодоление трения, N_r , то

$$N = N_s + N_r. \quad (33)$$

КПД привода станка η указывает, какая доля всей мощности расходуется на процесс резания:

$$\eta = \frac{N_s}{N_s + N_r} = \frac{N_s}{N}. \quad (34)$$

Для коробки скоростей КПД обычно находится в пределах $\eta = 0,75 \div 0,85$.

Как известно из механики, при последовательной передаче мощности через ряд кинематических пар общий КПД передачи может быть получен как произведение КПД отдельных пар:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n. \quad (35)$$

Поэтому, имея схему привода станка и зная значения КПД для зубчатых передач, подшипников и других пар трения, можно подсчитать ориентировочно значение КПД привода. Такой метод подсчета КПД даст удовлетворительные результаты лишь в определенных условиях.

Во-первых, КПД привода зависит от величины полезной нагрузки. Если $N_s = 0$, то и $\eta = 0$, так как никакой полезной работы не совершается. С ростом N_s значение КПД приближается к своему стабильному значению. Поэтому подсчет КПД привода как произведения КПД отдельных передач должен производиться для случая передачи полной мощности, а КПД отдельных пар должен быть получен для того же диапазона мощностей. Во-вторых, существенное влияние на значение КПД оказывают скорости передач. Если в известных пределах повышение скорости увеличивает передаваемую полезную мощность и КПД привода растет, то при значительном повышении скоростей увеличиваются потери на трение. Во многих случаях высокие скорости могут привести к повышенным ударам в передачах (зубчатых, цепных), к выдавливанию смазки, к вибрациям и повышенным деформациям передач и т. д. Поэтому КПД пар и привода изменяются, и он может быть определен

либо экспериментально, либо на основании эмпирических формул.

Повышение КПД привода достигается при улучшении смазки передач за счет применения более точных передач и качественного их монтажа. Большое значение имеет также такая структура привода, при которой сокращаются кинематические цепи, передающие движение, и отключаются цепи и механизмы, не участвующие в передаче данной скорости.

Особенности расчета элементов и механизмов коробок скоростей и подач. Расчет валов, подшипников, зубчатых передач и отдельных элементов коробок скоростей и подач производится методами, известными из курсов «Детали машин» и «Сопротивление материалов» с учетом характера действующих сил. Специфичным является учет отдельных коэффициентов, определяющих условия работы станка, введение ограничений по скоростям и нагрузкам, отражающим опыт эксплуатации станков, а также учет динамических нагрузок (см. раздел 3).

Для расчета вала и его подшипников определяются проекции всех действующих сил в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Валы обычно рассматривают как балки на шарнирных опорах, что соответствует наиболее типичному случаю для валов коробок скоростей, когда в каждой опоре установлен один подшипник качения. Если на валу расположено несколько поочередно работающих зубчатых колес, то необходимо выяснить, в каком случае имеют место наибольшие нагрузки на опоры и наибольший изгибающий момент на валу. Для этого иногда приходится производить расчет при нескольких включениях. Определенную специфику имеет расчет зубчатых передач. От их габаритных размеров и

качества выполнения во многом зависят размеры и эксплуатационные характеристики всего привода. Основными причинами выхода из строя зубчатых колес станков являются усталость поверхностных слоев зубьев, их износ, смятие торцов зубьев переключающихся зубчатых колес и реже — поломка зубьев от усталости или перегрузок.

Для расчета зубчатых колес на прочность применяют стандартные методы (ГОСТ 21354—75), которые предусматривают расчет на контактное сопротивление усталости активных поверхностей зубьев и на сопротивление усталости зубьев при изгибе. Диаметр зубчатых колес в большинстве случаев определяется в коробках скоростей контактными напряжениями, т. е. сопротивлением усталости поверхностных слоев, а в коробках подач — сопротивлением усталости при изгибе. Специфика расчета по сравнению с принятыми в курсе деталей машин заключается в том, что число зубьев z известно из кинематического расчета. Поэтому определяется модуль m , а не межцентровое расстояние $A = \frac{z_1 + z_2}{2} m$. Полу-

ченные значения модуля округляют до стандартных значений, принятых в станкостроении: $m = 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 16$ мм.

Максимальная окружная скорость зубчатых колес, как правило, не должна превышать 16—18 м/с. Так как окружные скорости колес зависят от частоты вращения и диаметра, для скоростных передач целесообразно применять зубчатые колеса с высоким значением допускаемых напряжений (цементированные, закаленные) с тем, чтобы они имели минимальные размеры. При повышении точности зубчатых передач существенно снижаются динамические нагрузки.

Глава 10 Шпиндельные узлы станков

§ 1. Шпиндели станков

Шпиндель — одна из наиболее ответственных деталей станка. Он является последним звеном коробки скоростей, несущим заготовку или инстру-

мент. От него во многом зависит точность обработки. Это заставляет предъявлять к шпинделю дополнительные требования. Расчет и конструктивное оформление шпинделей имеет свою специфику по сравнению с обычными

валами. На конструкцию шпинделя влияют требования жесткости и точности его вращения, что определяет его размеры, расположение и вид опор, а также вид привода, метод крепления патрона (передние концы шпинделя стандартизованы), наличие отверстия в шпинделе для возможности обрабатывать прутковый материал и др. Пример конструктивного оформления шпиндельного узла показан на рис. 67.

Выбор типа передачи на шпиндель (зубчатая или ременная) зависит в первую очередь от частоты вращения и от величины передаваемой силы. Зубчатая передача более проста и компактна и передает значительные крутящие моменты. Однако из-за ошибок шага она не сможет обеспечить высокое качество обработки на прецизионных станках, а в станках с переменными силами резания уменьшается плавность вращения шпинделя и возрастают динамические нагрузки в деталях коробки скоростей. Поэтому передача вращения шпинделю зубчатыми колесами применяется обычно для частоты вращения до 2000—3000 об/мин.

Однако требования к размерам приводят к тому, что зубчатые передачи применяют и для более высоких значений частот. Это возможно при повышенных требованиях точности к зубчатым колесам, их опорам и к монтажу передач. Например, в многшпиндельном токарном автомате 1Б216-6К наибольшая частота вращения шпинделей, приводимых зубчатой передачей, равна 5000 об/мин.

При применении ременной передачи получается некоторое увеличение размеров и усложнение конструкции, так как шкив следует устанавливать на самостоятельные опоры, чтобы разгрузить шпиндель. Однако в этом случае обеспечиваются плавность вращения шпинделя и высокое качество обработки.

- Для станков с прерывистым резанием применение ременной передачи снижает максимальные значения крутящих моментов из-за податливости ременной передачи и возможности мгновенного проскальзывания. Неравномерность вращения шпинделя при динамических нагрузках будет тем большая, чем меньше жесткость ременной передачи.

Ременный привод может обеспечить частоту вращения шпинделя до

6000 об/мин и выше, когда окружные скорости ремня доходят до 60—100 м/с. Для привода скоростных шпинделей, например, внутришлифовальных станков часто применяются высокочастотные асинхронные электрошпиндели с короткозамкнутым ротором на 200—800 Гц, несущие шлифовальный круг.

Шпиндели рассчитывают на жесткость. Для тяжело нагруженных шпинделей производят поверочный расчет на прочность. При расчете на жесткость шпиндель заменяют балкой на опорах, причем тип опоры выбирают в зависимости от типа подшипника (рис. 71).

При двух шариковых подшипниках качения расчетная схема принимает вид балки на ножевых опорах (рис. 71, а). Если в передней опоре два подшипника качения или один роликовый, то можно считать, что шпиндель в этом сечении не имеет поворота (рис. 71, б). Если в передней опоре применен подшипник скольжения (рис. 71, в), то он создает определенный реактивный момент M_p , который приближенно равен $0,3—0,35$ от $M_{изг}$ в передней опоре. При двух подшипниках скольжения (рис. 71, з) следует вначале определить прогиб y_1 при деформации шпинделя в пределах радиального зазора подшипников, рассматривая его как балку на двух ножевых опорах. Если сила вызывает большую деформацию, то следует подсчитать прогиб y_2 конца шпинделя от той составляющей силы, которая деформирует его как консольную балку с заделкой в передней опоре. Суммарный прогиб $y = (y_1 + y_2)$. К прогибу шпинделя следует добавить его деформацию на упругих опорах, рассматривая при этом шпиндель как жесткое тело. При определении прогиба шпинделя для приближенных расчетов допустимо выбирать средний момент инерции по основному участку шпинделя или определять его по расчетному среднему диаметру:

$$d_{cp} = \frac{\sum d_i l_i}{L}, \quad (36)$$

где d_i , l_i — диаметры и длина участков шпинделя; L — общая длина шпинделя.

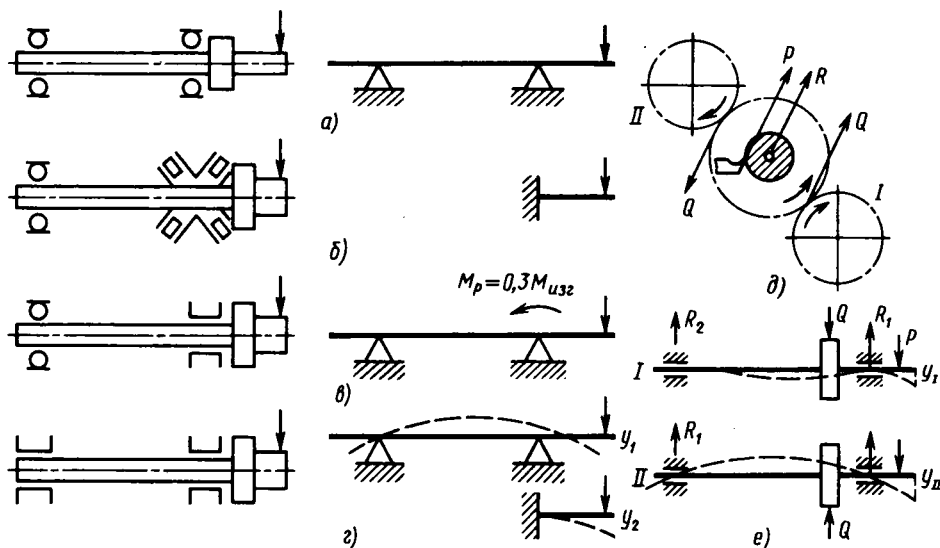


Рис. 71. Расчетные схемы шпинделей

Для шпинделей с резкими переходами сечений при уточненных расчетах следует строить упругую линию шпинделя, как ступенчатого вала со своим моментом инерции сечения на каждом участке или применять метод начальных параметров. Характер нагрузки на шпиндель учитывается коэффициентом K , на который умножают значение окружной силы: $K=1$ при спокойной работе (токарные, сверлильные, шлифовальные станки), $K=1,25$ при значительных колебаниях нагрузки (фрезерные, зубофрезерные станки) и $K=1,4$ при ударной нагрузке (долбежные, зубодолбежные, строгальные станки).

Допустимую величину прогиба определяют исходя из точности обработки на станке. При приближенных расчетах допустимый прогиб шпинделя выбирают исходя из опыта эксплуатации станков. Можно принимать его равным $1/3$ от допустимого биения шпинделя. Часто допустимый прогиб конца шпинделя подсчитывают по формуле $y_{\text{доп}} = (0,0001 \div 0,0002) l$, где l — расстояние между опорами шпинделя, а максимально допустимый угол поворота конца шпинделя принимают равным $\theta_{\text{max}} = 0,001$ рад.

На величину деформации шпинделя и реакцию в опорах влияет положение приводного зубчатого колеса, передающего вращение на шпиндель (рис. 71, д, е)

В схеме I результирующая сила R , определяющая величины реакций R_1 и R_2 в передней и задней опорах, равна сумме силы резания P и нагрузки Q на зубчатое колесо. В схеме II $R = P - Q$. Схема II выгоднее в тех случаях, когда необходимо уменьшить реакцию в передней опоре (рис. 71, а). Схема I более благоприятна, если требуется минимальный прогиб шпинделя, так как при этом $y_I < y_{II}$. Поэтому схему I чаще применяют в точных станках, а схему II — в станках для черновой обработки. Расчет шпинделей на виброустойчивость рассмотрен в разделе 3. В качестве опор шпинделей применяют прецизионные подшипники качения и подшипники скольжения с жидкостным трением. К опорам шпинделей предъявляют следующие основные требования.

1. Необходима высокая точность вращения. Биение шпинделя станков нормальной точности находится в пределах $0,01—0,03$ мм, а для прецизионных станков достигает нескольких микрометров. Эту точность могут обеспечить подшипники качения и скольжения. Однако в последнем случае при изменении нагрузки скорости ось вращения шпинделя будет смещаться, так как изменяется толщина масляной пленки.

2. Опоры шпинделей должны быть долговечны. Подшипники качения име-

ют ограниченный срок службы, зависящий от частоты вращения шпинделя и от нагрузки. Подшипники скольжения изнашиваются только в период пуска, останова или реверса станка, и поэтому при редких включениях станка могут работать длительное время без ремонта.

3. Виброустойчивость опор — важное условие для работы высокооборотных шпинделей. Современные прецизионные подшипники качения отвечают требованию виброустойчивости. Подшипники скольжения обладают способностью гасить колебания за счет демпфирующего действия масляного слоя.

4. Для универсальных станков необходимо, чтобы подшипники работали одинаково надежно во всем диапазоне применяемых скоростей и нагрузок. В этом отношении неоспоримое преимущество имеют подшипники качения.

5. Эксплуатационными преимуществами (легкость замены, меньший уход и т. п.) также обладают подшипники качения, в результате чего они и получили наибольшее распространение. Для тех станков, где имеет место более постоянный режим работы, где редкие периоды пуска станка и требуется высокая виброустойчивость шпинделя, с успехом применяются подшипники скольжения. К таким станкам в первую очередь относятся шлифовальные станки, занимающие все большее место в общем парке станков.

§ 2. Подшипники качения

Для шпинделей станков практически применяют все основные типы подшипников качения: шариковые радиальные

и радиально-упорные, роликовые с коническими и цилиндрическими роликами, а также специальные конструкции. Последние отличаются от обычных не только повышенной точностью, грузоподъемностью и быстроходностью, но и конструктивными особенностями. К таким подшипникам относятся двухрядный подшипник с цилиндрическими роликами (см. рис. 67). Двойной ряд точных роликов и их шахматное расположение повышает грузоподъемность подшипника. Точность вращения шпинделей в таких подшипниках может быть обеспечена в пределах нескольких микрометров.

По данным А. М. Фигатнера [54], в качестве характеристики работоспособности шпиндельных опор качения можно принять следующие показатели:

$$K_1 = \frac{N}{D}, \text{ Вт} \cdot \text{мм}^{-1}; \quad K_2 = 10^{-5} D n_{\max},$$

$$\text{мм} \cdot \text{мин}^{-1}; \quad K_3 = \frac{N}{d}, \text{ Вт} \cdot \text{мм}^{-1}; \quad K_4 = 10^{-5} d n_{\max}, \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1},$$

где N — мощность привода; $n_{\max}$ — наибольшая частота вращения шпинделя; D — максимальный диаметр обрабатываемой детали; d — диаметр шпинделя в передней опоре. Здесь показатели K_1 и K_3 характеризуют среднюю нагруженность шпиндельных узлов станка, а K_2 и K_4 — их быстроходность.

Развитие конструкций шпиндельных узлов характеризуется возрастанием указанных показателей. Это связано с применением специальных типов подшипников качения, основные из которых показаны на рис. 72.

Шарикоподшипник упорно-радиальный двухрядный с углом контакта 60° (рис. 72, а) предназначен для вос-

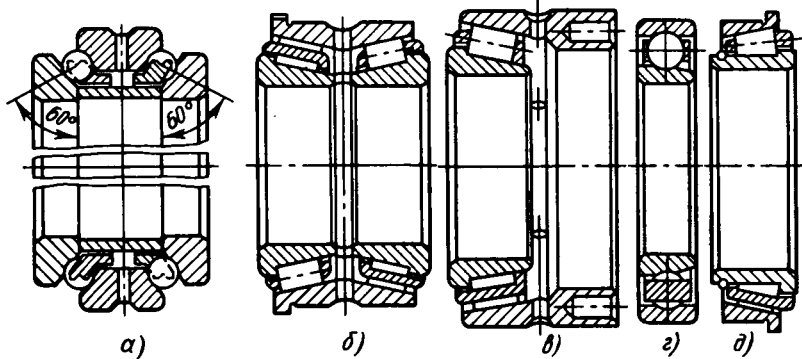


Рис. 72. Специальные подшипники качения для шпинделей

приятия осевой нагрузки. Его устанавливают рядом с двухрядным роликоподшипником с короткими цилиндрическими роликами. Параметр быстроходности $d_m n_{\max} = (4 \div 5) 10^5 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$, что в 2—2,5 раза больше, чем у обычных упорных шарикоподшипников; здесь $d_m = (D_n + d_0)^{0.5}$, где D_n — наружный диаметр подшипника; d_0 — диаметр отверстия подшипника.

Роликоподшипники конические однорядные и двухрядные с буртом на наружном кольце (рис. 72, б, д) предназначены для восприятия радиальной и осевой нагрузок. Их устанавливают, как правило, в передней опоре шпинделя; $d_m n_{\max} = (3,9 \div 4,2) 10^5 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$. Роликоподшипник конический однорядный с широким наружным кольцом (рис. 72, в) устанавливают в заднюю опору шпинделя. Параметр быстроходности имеет то же значение, что у подшипников, показанных на рис. 72, б, д.

Особо быстроходный радиально-упорный шарикоподшипник в универсальном исполнении (рис. 72, г) пред-

назначен для восприятия радиальной и осевой нагрузок. Подшипники собирают в комплекты (два, три или четыре подшипника).

Для обеспечения высокой точности вращения, шпиндели устанавливают в подшипниках повышенных классов точности: высокий (5 кл.), прецизионный (4 кл.), сверхпрецизионный (2 кл.) (ГОСТ 520—71).

На рис. 73, а—е представлены схемы шпиндельных узлов, в которых использованы специальные подшипники. Шпиндельные узлы, приведенные на рис. 73, а, предназначены для средних и тяжелых токарных, фрезерных, фрезерно-расточных и шлифовальных станков; их используют при работе на высоких скоростях с умеренной и большой нагрузкой. Узлы на рис. 73, б применяют для выпускаемых крупными сериями и тяжелых токарных станков; их используют при работе на умеренных скоростях с большой нагрузкой. Шпиндельные опоры, данные на рис. 73, в, предназначены для выпускаемых

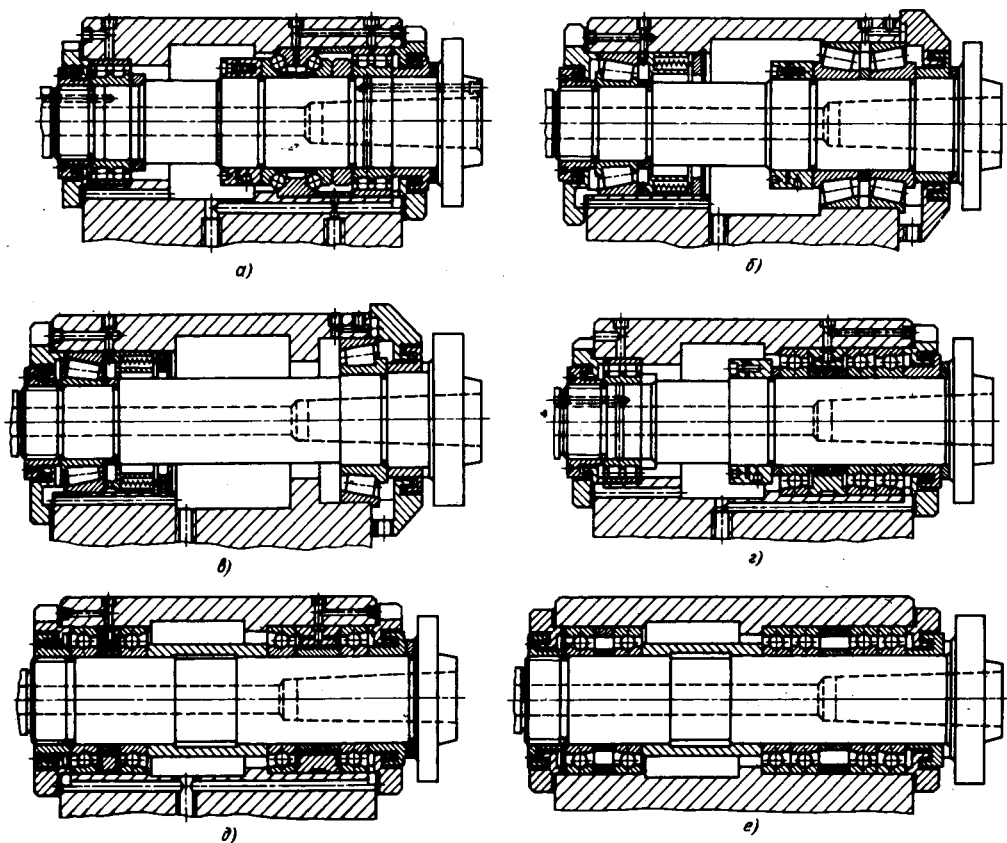


Рис. 73. Типовые схемы шпиндельных узлов

крупными сериями легких и средних токарных, фрезерных и шлифовальных станков, а опоры, показанные на рис. 73, *г*, для легких и средних токарных, фрезерных, шлифовальных и фрезерно-расточных станков; их используют при работе на высоких скоростях. Шпиндельные узлы на рис. 73, *д* предназначены для легких шлифовальных, отделочно-расточных и агрегатных станков, а узлы на рис. 73, *е*—для средних и тяжелых шлифовальных станков. Характеристики быстроходности этих узлов при эффективных системах смазки (инжекционной, масляным туманом) находится в пределах $K = 2,5 \div 6 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Следует сказать, что деление на области применения шпиндельных узлов различных типов условно, поскольку на быстроходность и несущую способность шпиндельных узлов помимо быстроходности и грузоподъемности их подшипников существенно влияет комплекс других конструктивных и технологических параметров.

Для повышения жесткости шпиндельных опор и устранения зазоров между отдельными телами качения и кольцами применяют предварительный натяг подшипников качения, т. е. постоянную дополнительную нагрузку P_n . Хотя долговечность подшипника при этом несколько снижается, так как на него действует суммарная нагрузка, равная рабочей и предварительному натягу $P = P_0 + P_n$, но получаемая более высокая точность шпиндельного узла является большим преимуществом данного метода.

Существуют различные способы создания предварительного натяга. Они зависят от типа подшипников и конструкции опор. Например, в радиальных шарикоподшипниках осевое смещение наружных или внутренних колец относительно друг друга создает предварительную деформацию в подшипниках. Это достигается установкой распорных втулок или колец неодинаковой длины или с помощью специальных пружин, которые обеспечивают сохранение силы предварительного натяга и при износе подшипников. При применении подшипников с цилиндрическими роликами предварительный натяг создают деформацией внутреннего кольца подшипника, которое имеет конусную

расточку и с помощью гайки устанавливают на коническую шейку шпинделя.

Натяг или зазор шпиндельных подшипников качения регулируют обычно специальными приспособлениями на собранном узле шпинделя вне или на станке. От тщательности и точности регулирования во многом зависит работоспособность шпиндельного узла.

Однако следует иметь в виду, что зазоры или натяги, полученные на шпиндельном узле (холодном), изменяются по мере его работы (нагрева) за счет тепловых деформаций системы. Поэтому окончательное регулирование шпиндельных подшипников производят после периода работы (обкатки) шпиндельного узла при достижении заданного уровня температуры в зоне подшипников.

При работе шпиндельного узла передняя опора шпинделя воспринимает основные нагрузки и находится ближе к месту обработки. Поэтому в передней опоре помещают более точные подшипники, часто сдвоенные (для увеличения жесткости). Точность передних подшипников обычно на класс выше, чем задних. В том случае, если осевые нагрузки воспринимаются передней опорой, задняя опора выполняется плавающей, т. е. не закрепленной в осевом направлении. При проектировании подшипниковых узлов необходимо обращать внимание на уплотнения подшипников, защищающие их от загрязнения и предотвращающие вытекание смазки. В шпинделях станков более целесообразно применять лабиринтные уплотнения, которые не имеют трущихся поверхностей и могут работать при высоких скоростях вращения.

Подшипники качения теряют свою работоспособность в основном в результате усталости поверхностных слоев дорожек и тел качения, хотя могут происходить поломки сепараторов, износ и смятие дорожек качения. Подшипники качения рассчитывают на долговечность, оценивая число оборотов L , которое выдержит подшипник за расчетный срок службы:

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^a \quad (37)$$

где P — эквивалентная (расчетная) нагрузка; C — динамическая грузоподъемность данного типоразмера подшипника, взятая из каталога; показатель степени $a=3$ — для шарикоподшипников, $a=3,33$ — для роликоподшипников.

При определении расчетных нагрузок, действующих на опору, следует учитывать переменность работы шпинделя станка, поскольку работа происходит при различных частотах вращения и нагрузках. Кроме того, следует учитывать, что шпиндель, несущий инструмент или заготовку, подвергается* дополнительным динамическим нагрузкам, возникающим в процессе резания. Это учитывается коэффициентом динамичности K_d ; для токарных, сверлильных и шлифовальных станков $K_d=1,5$ и для фрезерных станков $K_d=2$.

Сила предварительного натяга подшипников A_n увеличивает осевую нагрузку A , которая становится равной $A+A_n$. Минимальное значение предварительного натяга должно определяться из условия, чтобы после приложения к шпинделю полезной нагрузки в подшипнике не образовался зазор. Из этого условия $A_n > 1,58R \operatorname{tg} \beta \mp 0,5A$, где R — внешняя радиальная нагрузка, A — внешняя осевая нагрузка (плюс ставят, если она ослабляет натяг, и минус, если увеличивает его), β — угол контакта тел качения с кольцом.

Долговечность подшипника, рассчитанная по каталожным значениям C , соответствует 90%-ной вероятности его безотказной работы (см. гл. 18). Однако для шпиндельных подшипников необходимо обеспечить более надежную работу, чтобы отказ шпиндельного узла не произошел в период между плановыми ремонтами станка. При расчете нового значения динамической грузоподъемности C_a можно использовать коэффициент K_a (рис. 74), считая $C_a = K_a C$. Например, если надо, чтобы шарикоподшипник безотказно работал с вероятностью 99% (т. е. $\alpha=1\%$), то по графику получаем $K_a=0,62$, и срок службы подшипника должен быть уменьшен по формуле (37) в $\left(\frac{1}{0,62}\right)^3 = 2,6$ раза. Следует также учитывать, что до потери подшипником работо-

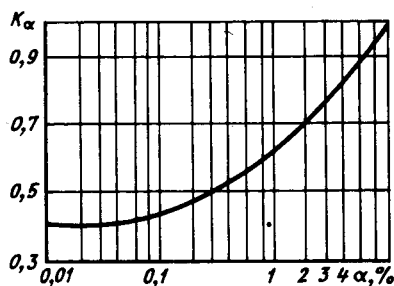


Рис. 74. График изменения K_a для расчета долговечности подшипников качения из условия их повышенной надежности

способности по выносливости его износ или деформация могут привести к уменьшению точности вращения. Величина биения шпинделя обычно линейно возрастает со временем (хотя изменение, как правило, незначительно), и эта зависимость может быть получена экспериментально.

§ 3. Подшипники скольжения

Для надежной работы шпиндельного подшипника скольжения необходимо, чтобы несущий масляный слой, разделяющий шейку шпинделя и подшипника, имел необходимые толщину и жесткость во всем диапазоне скоростей и нагрузок.

При износе и при сильном изменении режима работы станка должна быть предусмотрена возможность регулирования зазора между шейкой шпинделя и подшипником. Желательно, чтобы при регулировании не было искажения формы подшипника, так как это может повлиять на условия жидкостного трения и точность вращения шпинделя. Кроме того, подшипник должен самоустанавливаться при деформации шпинделя, чтобы не было кромоных давлений, а положение оси шпинделя не становилось эксцентричным по отношению к оси подшипника. Этим условиям не удовлетворяют, как правило, обычные конструкции подшипников скольжения, и поэтому для шпиндельных узлов широко применяют специальные подшипники жидкостного трения. В этих подшипниках создают несколько клиновых зазоров, чтобы заставить гидродинамические силы действовать на шпиндель в различных на-

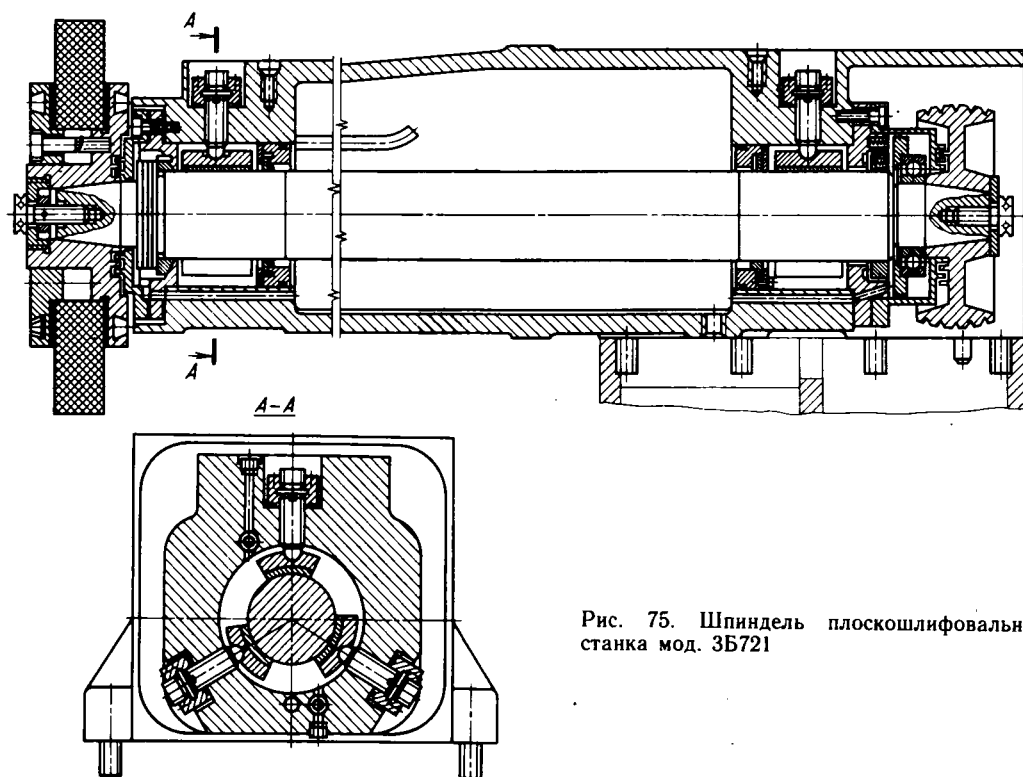


Рис. 75. Шпиндель плоскошлифовального станка мод. 3Б721

правлениях и тем самым фиксировать его в центральном положении. Для возможности самоустановки применяют подшипники, состоящие из отдельных сегментов. На рис. 75 показан шпиндель плоскошлифовального станка особо высокой точности мод. 3Б721, вращающийся на трехсегментных подшипниках с частотой вращения $n = 2205$ об/мин.

Сегменты опираются на сферические головки регулируемых штырей и поэтому могут самоустанавливаться в тангенциальном направлении для образования масляного клина и в осевом направлении по образующей шейки шпинделя. Такая конструкция хорошо себя зарекомендовала с точки зрения стабильности положения оси шпинделя в подшипнике и надежного обеспечения жидкостного трения. Вкладыши подшипников находятся в масляной ванне. Тщательно отфильтрованное масло подают в каждый подшипник под давлением. Для точной фиксации шпинделя в осевом направлении у его переднего конца имеется бурт, который прижимается к самоустанавливающемуся бронзовому кольцу. Прижим осуществляется пружинами, действующи-

ми на наружное кольцо радиально-упорного шарикоподшипника, посаженного на заднем конце шпинделя.

Все большее применение в станках находят гидростатические подшипники скольжения, когда давление в масляном слое создается специальным насосом высокого давления. В этом случае при реверсе и останове шпинделя, а также при любых низких частотах вращения обеспечивается жидкостное трение. Срок службы может быть неограниченно большим. Недостатками гидростатических подшипников являются большой расход масла и необходимость иметь специальную систему для подачи масла под давлением. Особенность конструкции гидростатических подшипников заключается в применении специальных карманов, масло к которым дросселируется через тонкие капиллярные трубки.

Шпиндельный узел токарно-винторезного станка особо высокой точности мод. 16Б20А показан на рис. 76. Станок предназначен для окончательной обработки различных деталей для нарезания высокоточных резьб. Диапазон частот вращения шпинделя $n =$

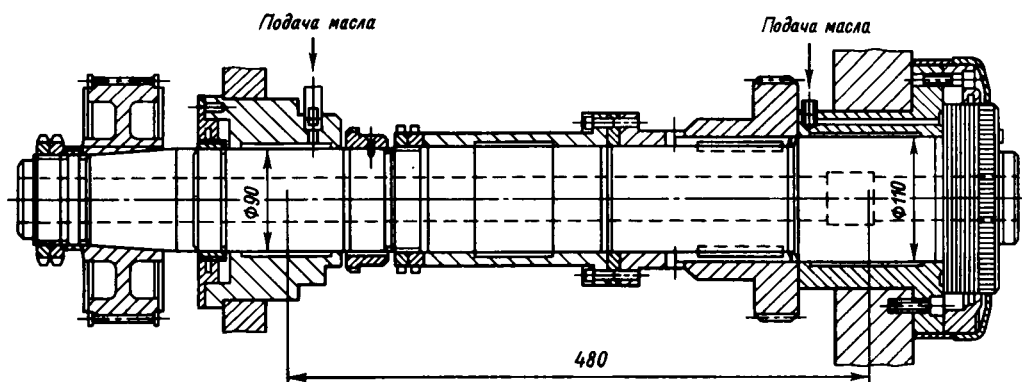


Рис. 76. Шпиндель токарно-винторезного станка мод. 16Б20А

$= 12 \div 3000$ об/мин, регулирование частот вращения бесступенчатое, отклонение от круглости обработанных деталей до 0,6 мкм. Масло подводят в карманы каждого из подшипников, причем на торцах передней втулки выполнены гидростатические подпятники с кольцевыми канавками. Диаметральный зазор между шейкой шпинделя и подшипником равен 60 мкм.

Большой интерес представляет применение подшипников с газовой смазкой (аэродинамических и аэростатических подшипников). Малая вязкость воздуха обеспечивает небольшой момент трения и соответственно малое тепловыделение, поэтому не требуется специальных устройств для отвода тепла, кроме вентиляции. Температура и давление воздуха практически не влияют на его вязкость, что обеспечивает стабильность работы подшипника.

Шпиндели на аэродинамических опорах применяются для частоты вращения до 300 000 об/мин. Они должны быть выполнены с высокой точностью и обеспечивать в первый период работы поддув для создания аэростатической подушки.

Шпиндельный узел на аэростатических опорах, предназначенный для шлифования наружных колец приборных шарикоподшипников, приведен на рис. 77. Два прецизионных подшипника и два подпятника выполнены из бронзы и приклеены к корпусу эпоксидным клеем. По каналам к подшипникам и подпятникам под давлением подается сжатый воздух, который подводится через четыре отверстия диа-

метром 0,33 мм к подпятникам, а к подшипникам через питающие радиальные щели шириной 22 мм и глубиной 15—20 мкм. Для образования щелей подшипники выполнены составными из трех колец. Диаметральный зазор между шейкой шпинделя и подшипником составляет 50—55 мкм.

Подшипники скольжения шпинделей с масляной смазкой рассчитывают на жидкостное трение так, чтобы между шейкой вала и подшипником не было непосредственного касания поверхностей и их разделял слой смазки. Предварительный выбор размеров гидродинамического подшипника, его длины l и диаметра D производят обычно по характеристике pv , где p — условное диаметральное давление на подшипник, v — окружная скорость. Для шпинделей станков со средними частотами вращения и при $p \leq 300$ Н/см² принимают $pv = 100 \div 150$ Н/см² · (м/с). Уточненный расчет основывается на гидродинамической теории жидкостного трения. Согласно этой теории, положение вала в подшипнике и минималь-

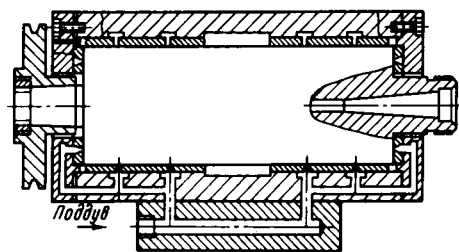


Рис. 77. Шпиндельный узел шлифовального станка мод. ЛЗ-246

ная толщина масляного слоя $h_{\min}$ зависят от безразмерной характеристики режима:

$$\lambda = \frac{\omega \mu}{p}, \quad (38)$$

где ω — угловая скорость вала, с^{-1} ; μ — динамическая вязкость масла, $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$; p — удельное давление, $\text{Н}/\text{м}^2$.

Диапазон работы подшипника определяется значениями: $\lambda=0$ (при $\omega=0$, или $p=\infty$), когда вал лежит в подшипнике и $h_{\min}=0$; и $\lambda=\infty$ (при $\omega=\infty$ или $p=0$), когда вал занимает центральное положение в подшипнике и $h_{\min}=\frac{\Delta}{2}$, где $\Delta=D-d$ — диаметральный зазор между шпинделем и подшипником. Гидродинамическая теория позволяет найти значение $h_{\min}$ в функции λ и других параметров. Чтобы не возник металлический контакт между шейкой шпинделя и подшипником, необходимо выполнение условия

$$h_{\min} > \delta_n + \delta_w + y, \quad (39)$$

где δ_n , δ_w — наибольшее значение микронеровностей поверхности подшипника и шпинделя; y — наибольший прогиб шейки шпинделя в подшипнике.

Если зависимость (39) не соблюдается и, следовательно, имеется опасность нарушения жидкостного трения, необходимо уменьшить зазор Δ или увеличить вязкость масла; улучшить качество обрабатываемых поверхностей, увеличить жесткость шпинделя; увеличить размеры подшипника с тем, чтобы уменьшилось давление p .

Чем больше частота вращения шпинделя, тем меньше опасность нарушения жидкостного трения, и поэтому высокооборотные шпиндели надежно работают в условиях гидродинамической смазки. Однако при росте частоты вращения шпинделя увеличивается коэффициент жидкостного трения и соответственно растет тепловыделение. В этом случае необходим тепловой расчет подшипника, который заключается в сравнении величин тепловыделения и теплоотвода путем решения уравнения теплового баланса.

Количество отводимого тепла при нормальной температуре смазки ($\theta = 60 \div 70^\circ \text{C}$) должно быть больше выделяемого. В противном случае повышение температуры приведет к падению

вязкости масла, нарушению жидкостного трения и выходу из строя шпиндельного узла. Количество выделяемого в масляном слое тепла (Дж/с) может быть подсчитано по формуле

$$Q_1 = Pvf, \quad (40)$$

где P — нагрузка, Н ; v — скорость шейки вала, $\text{м}/\text{с}$; $f=0,02 \div 0,002$ — коэффициент жидкостного трения.

Количество отводимого тепла Q_2 зависит от конструкции опор и корпуса, свойств масла, параметров подшипника, метода охлаждения опоры и может быть определено экспериментально или подсчитано по приближенным формулам [11]. При работе подшипника должно соблюдаться условие $Q_2 \geq Q_1$. При расчете гидростатических подшипников обычно определяют их нагрузочную способность P (Н), которая зависит от давления масла, создаваемого насосом p_n (МПа), и эффективной площади подшипника (без площади карманов) $F_{\text{эф}}$:

$$P' = C_p p_n F_{\text{эф}}, \quad (41)$$

Коэффициент C_p является функцией относительного смещения $\varepsilon = \frac{2e}{\Delta}$ (эксцентриситета) вала в подшипнике, где e — абсолютный эксцентриситет; Δ — диаметральный зазор. Обычно $0 \leq \varepsilon \leq 0,35$ и для предварительных расчетов можно принять $C_p = 1,5\varepsilon$, $F_{\text{эф}} = 0,5D^2$, в результате формула (41) примет вид

$$P = 1,5 \frac{\varepsilon}{\Delta} D^2 p_n. \quad (42)$$

Жесткость гидростатического подшипника, т. е. сопротивление сжатию масляного слоя

$$j = \frac{P}{e} = \frac{1,5D^2 p_n}{\Delta}. \quad (43)$$

Из формулы видны основные пути повышения жесткости гидростатической опоры.

Гидростатические подшипники рекомендуются применять как для шпинделей особо точных станков, так и для тяжело нагруженных станков с низкими частотами вращения шпинделя, где затруднено образование масляного слоя за счет гидродинамического эффекта [45]. Обычно делают четыре кармана, длина подшипника равна его диаметру,

и $\frac{\Delta}{D} = 0,0006 \div 0,00065$, что обеспечивает высокую жесткость и устойчивость движения при окружных скоростях до 15 м/с.

§ 4. Расчет шпиндельного узла на жесткость с использованием ЭВМ

При расчетах шпиндельного узла на жесткость необходимо учитывать сложность формы шпинделя, податливость его опор, различный характер внешних нагрузок, возможность применения третьей опоры. Поскольку такой расчет содержит большое число вычислений, целесообразно применение ЭВМ. Рассмотрим методику расчета в общем виде. Расчетную схему узла можно представить балкой (длиной l) на податливых или жестких опорах (рис. 78). Начало координат выбирают на левой крайней опоре шпинделя. В общем случае шпиндель нагружен сосредоточенными силами P и моментами M с координатами x_P и x_M и распределенными нагрузками Q на участке $x_0 - x_Q$. Обозначим податливость опоры C , координаты опор x_R , реакцию опор R . Ступень шпинделя с моментом инерции J_i расположена на участке $x_i - x_{i-1}$. Число нагрузок, опор и ступеней не ограничивается. В сечении с координатой x балка имеет прогиб $y(x)$, угол поворота $D_y(x)$ и внутреннюю силу $H(x)$, изгибающий момент $W(x)$. В начале координат параметры характеризуются начальными значениями: $y(0)$, $D_y(0)$, $W(0)$, $H(0)$. Задача заключается в построении упругой линии шпинделя (в определении прогиба его конца). Основу расчета составляет метод начальных параметров, согласно которому балку постоянного сечения с моментом инерции J_1 можно заменить балкой с моментом инерции $J_0 = A_1 J_1$ и изменить при этом все нагрузки в A_1 раз. Упругие линии этих балок будут полностью идентичны. Это обстоятельство можно использовать для приведения шпинделя как ступенчатой балки (рис. 79, а) к балке постоянного сечения (рис. 79, з). Разделим ступенчатую балку на три части (по числу ступеней), как показано на рис. 79, б. Для того чтобы каждая из частей находилась в равновесии в се-

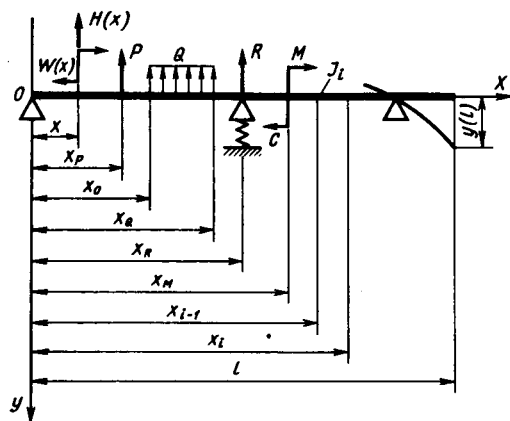


Рис. 78. Расчетная схема шпиндельного узла

чениях, необходимо приложить внутренние силы F_1 и F_2 и моменты W_1 и W_2 . При замене ступенчатой балки балкой постоянного сечения (рис. 79, з) необходимо соответствующие внутренние и внешние силы умножить на коэффициенты $A_1 = \frac{J_0}{J_1}$ и $A_2 = \frac{J_0}{J_2}$, где J_1, J_2 — моменты инерции преобразуемых сечений. Окончательно при соединении частей получаем балку постоянного сечения с моментом инерции J_0 с приведенной внешней нагрузкой, с дополнительными силами и моментами W_{di} , приложенными в сечениях перехода от ступени к ступени первоначальной балки. Уравнение упругой линии имеет вид

$$y(x) = y(0) + D_y(0)x - W(0)\frac{x^2}{2EJ} - H(0)\frac{x^3}{6EJ} - \sum \frac{M(x - x_M)^2}{2EJ} A_i - \sum \frac{P(x - x_P)^3}{6EJ} A_i - \sum \frac{Q(x - x_0)^4}{24EJ} A_i + \sum \frac{Q(x - x_Q)^4}{24EJ} A_i - \sum \frac{R(x - x_R)^3}{6EJ} A_i - \sum \frac{W_{di}(x - x_i)^2}{2EJ} - \sum \frac{F_i(x - x_i)^3}{6EJ}. \quad (44)$$

Для силовых факторов $W_{di}(x_i)$ и $F(x_i)$ можно записать уравнения:

$$W_{di} = (A_i - A_{i-1}) \left[W(0) + H(0)x_i + \right.$$

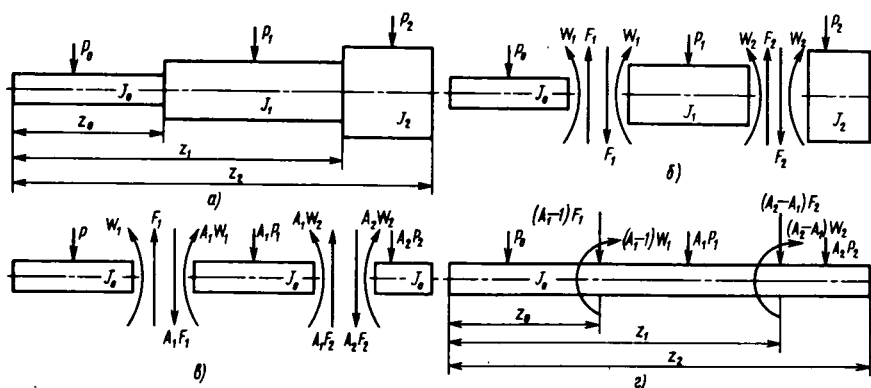


Рис. 79. Схема расчета шпинделя методом начальных параметров

$$\begin{aligned}
 & + \sum M + \sum P(x_i - x_P) + \frac{1}{2} \sum Q(x_i - x_0)^2 - \frac{1}{2} \sum Q(x_i - x_Q) + \sum R(x_i - x_R) \Big], \\
 & F_i = (A_i - A_{i-1})[H(0) + \sum P + \sum Q(x_i - x_0) - \sum Q(x_i - x_Q) + \sum R].
 \end{aligned}
 \quad (46)$$

Другие характеристики сечения балки с координатой x , например $D_y(x)$, определяют аналогичным образом.

Таким образом, расчет шпинделя сводится к оценке нагрузок ступенчатой балки и далее к расчету балки постоянного сечения, в качестве которого можно принять сечение шпинделя на первой ступени.

В состав каждого из уравнений входят члены, зависящие от заданных начальных параметров и нагрузок. Эти члены суммируются, образуя свободный член уравнения. При составлении системы уравнений образуется матрица коэффициентов при неизвестных и матрица свободных членов. Блок-схема расчета прогиба конца шпинделя $y(l)$ на ЭВМ приведена на рис. 80. Полученное значение прогиба шпинделя сравнивают с допустимым по условию точности обработки. Следует иметь в виду, что при одновременном учете жесткости опор и жесткости тела шпинделя имеется оптимальное соотношение между расстоянием x_R между опорами и длиной шпинделя l . Оно определяется из условия минимального прогиба конца шпинделя.

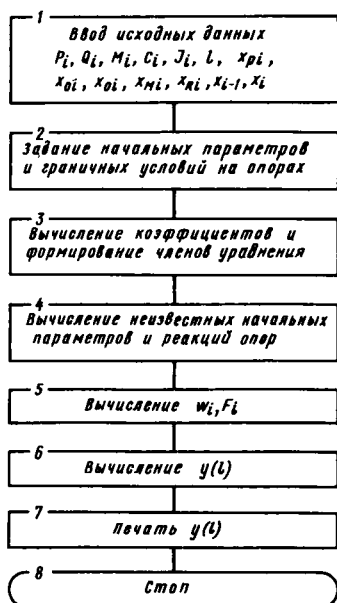


Рис. 80. Блок-схема алгоритма для расчета прогиба (z) шпинделя на ЭВМ

§ 1. Силы, действующие на корпусные детали станков

Базовые элементы, определяющие компоновку станка, состоят в первую очередь из корпусных деталей, которые включают станину, стойки, поперечины и другие детали, образующие контур станка и служащие базой для взаимного расположения его элементов. К ним относятся также корпуса коробов скоростей и подач, задние бабки, суппорты, столы, планшайбы станков, которые, воспринимая силы при обработке, передают их на станину и стойки. Подвижные корпусные узлы перемещаются по направляющим скольжения и качения, от которых во многом зависит точность станка (см. ниже). При расчете и анализе работоспособности базовых узлов и их направляющих необходимо в первую очередь оценить силы, действующие на основные элементы станка. Для этого разрабатывают расчетную схему, которая должна дать возможность определить напряженное состояние станка. В качестве примера на рис. 81, а показаны силы, действующие на корпусные элементы токарного станка. Силы резания P_x , P_y , P_z действуют на переднюю и заднюю бабки и на суппорт.

При обточке в центрах силы, дей-

ствующие на передний и задний центр, будут изменяться.

Составляющие в плоскости, перпендикулярной оси детали, будут на передней опоре

$$Z_A = P_z \frac{b}{l} - \frac{G}{2}; \quad Y_A = P_y \frac{b}{l} + P_x \frac{d}{2l};$$

$$A = \sqrt{Z_A^2 + Y_A^2}, \quad (47)$$

в задней опоре

$$Z_B = P_z \frac{a}{l} - \frac{G}{2}; \quad Y_B = P_y \frac{a}{l} - P_x \frac{d}{2l};$$

$$B = \sqrt{Z_B^2 + Y_B^2}, \quad (48)$$

где G — вес детали, d — диаметр детали.

Осевая сила X_A , действующая на переднюю бабку, складывается из составляющей силы резания P_x , из осевой составляющей полной реакции на центре (рис. 81, б), равной $A \operatorname{tg} \alpha$, и из силы предварительной затяжки $C_0 \approx 0,25 P_x$;

$$X_A = P_x + A \operatorname{tg} \alpha + C_0. \quad (49)$$

Осевая сила X_B , действующая на заднюю бабку, изменяется в процессе резания, так как сила P_x разгружает задний центр, уменьшая силу C_0 . Для расчета можно принять максимально возможное значение осевой силы

$$X_B = B \operatorname{tg} \alpha + C_0. \quad (50)$$

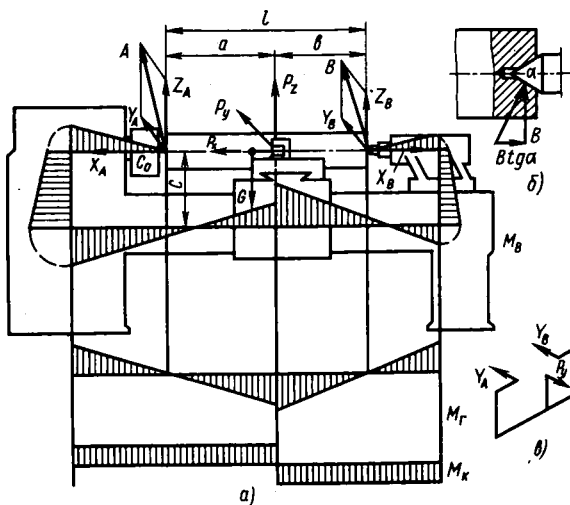


Рис. 81. Силы, действующие на корпусные элементы токарного станка

Силы резания, действующие на суппорт, передаются на станину и создают относительно ее оси изгибающие и крутящие моменты. В вертикальной плоскости станины приложен внешний момент $M = P_x C$, так как сила P_x параллельна оси станины. Максимальный скручивающий момент $M_k = P_y C$. На рис. 81,а показаны эпюры изгибающих моментов в вертикальной M_v и горизонтальной M_g плоскостях и эпюра крутящих моментов M_k , действующих на основные узлы станка. Схема сил, создающих M_k , показана на рис. 81,в. Полученные нагрузки являются исходными для расчета базовых узлов и механизмов станка.

§ 2. Станины станков

Станина является одной из наиболее ответственных деталей станка, которая определяет многие его эксплуатационные качества. Станина должна обладать высокой жесткостью, виброустойчивостью, технологичностью конструкции, иметь минимально возможную массу. На станине расположены направляющие прямолинейного или кругового движения. Станины современных станков весьма разнообразны по конструктивным формам и представляют собой сложную корпусную деталь. Станины могут быть горизонтальными и вертикальными (стойки). Горизонтальные станины тяжелых станков устанавливают непосредственно на фундамент по всей опорной поверхности. Станины легких станков устанавливают на ножки или на небольшую опорную поверхность основания. Форма станин обычно приближается к коробчатой с внутренними стенками и перегородками, которые нужны для повышения жесткости и для образования отдельных полостей и отсеков.

На рис. 82 показаны типичные профили поперечных сечений станин и сто-

ек. Замкнутый профиль 1, особенно усиленный ребрами 2, обладает большей жесткостью, чем полуоткрытый 3 или тем более открытый 4—6. Замкнутый профиль чаще применяют для стоек фрезерных, расточных, сверлильных и других станков, когда не требуется специальных устройств для отвода стружки. Для горизонтальных станин более характерен открытый профиль 4, когда две стенки соединены ребрами той или иной конфигурации. Для усиления стенок их в ряде случаев выполняют двойными (профиль 5). Для отвода через окна задней стенки стружки, часто в станине делают наклонную стенку (профиль 6). Часть контура станины в этом случае становится полуоткрытой и имеет повышенную жесткость.

Для открытых профилей повышение их жесткости достигается применением ребер, соединяющих стенки станины. Обычно применяют прямоугольные (рис. 83,а), диагональные (рис. 83,в) и П-образные (рис. 83,б) ребра. Станины обычно отливают из качественного серого чугуна и редко выполняют сварными из стали. Литые станины обладают большей способностью гасить колебания из-за высокого коэффициента внутреннего трения. Для тяжелых станков иногда делают станины из железобетона, которые хорошо воспринимают вибрации и меньше подвергнуты тепловым деформациям. Основным критерием для оценки работоспособности станины является ее жесткость. Из-за сложности конструктивных форм расчет станины выполняется обычно с использованием приближенных методов и экспериментальных данных.

Простые горизонтальные станины представляют как двухопорные балки с расчетной длиной l_p (рис. 84,а), вертикальные станины (стойки) заменяются консольными балками или открытыми рамами (рис. 84,б) с расчетной

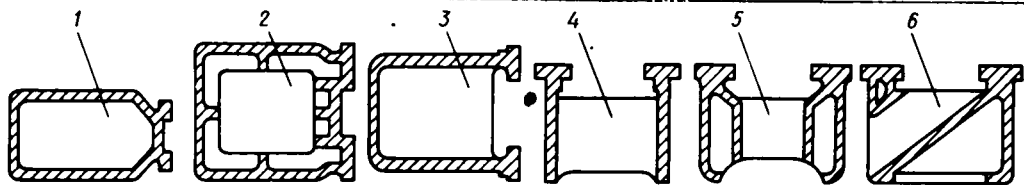


Рис. 82. Профили поперечных сечений станин

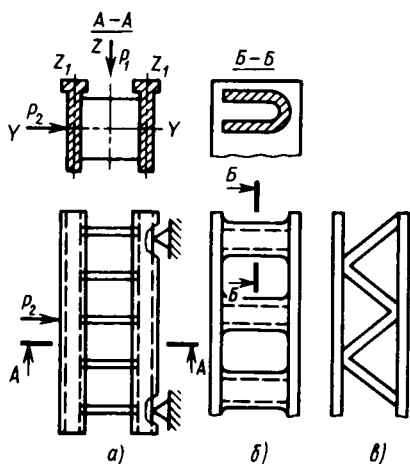


Рис. 83. Формы ребер станин

длиной l_{p2} , l_{p3} деформируемой части. Для портальных станин расчетной схемой будет жесткая статически неопределимая рама (рис. 84, в) с расчетными размерами l_{p4} и l_{p5} .

Расчет деформации станины под действием внешних сил является наиболее сложной задачей. В общем случае станина подвергается изгибу в двух плоскостях и кручению (см. рис. 81). В случае замкнутого профиля поперечного сечения деформации можно рассчитывать обычными методами, известными из «Сопротивления материалов».

При расчете деформаций станин незамкнутого профиля необходимо учитывать влияние ребер, соединяющих стенки станины. Как показали экспериментальные исследования ЭНИМС, ребра не оказывают существенного влияния при изгибе станины в вертикальной плоскости (рис. 83), и при определении деформации можно рассчитывать момент инерции сечения J_y относительно нейтральной оси $Y-Y$. Для увеличения жесткости в вертикальной плоскости следует делать приливы (ребра) на внутренней стенке станины либо двойные стенки. При изгибе в горизонтальной плоскости ребра оказывают существенное влияние на жесткость. Расчетный момент инерции J_p может быть в первом приближении получен на основании экспериментально полученного коэффициента $K_{изг}$, оценивающего жесткость ребер при работе на изгиб: $J_p = K_{изг} J_z$,

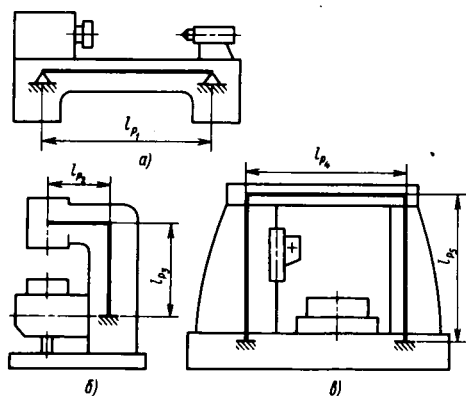


Рис. 84. Расчетные схемы станин

где J_z — момент инерции относительно оси Z , что соответствует абсолютно жестким ребрам. Можно принять для прямоугольных ребер $K_{изг} = 0,1 \div 0,2$, для П-образных ребер $K_{изг} = 0,3 \div 0,45$ и для диагональных ребер $K_{изг} = 0,4 \div 0,5$. Из этих данных, полученных для станин токарных станков, видно существенное влияние типа ребер на жесткость станины при изгибе.

При расчете на кручение замкнутых профилей станины можно пользоваться следующей формулой для тонкостенных профилей:

$$\varphi = \frac{M_k l_p}{4GF^2} \sum \frac{l_i}{\delta_i}, \quad (51)$$

где φ — угол закручивания; l_p — расчетная длина станины; G — модуль упругости второго рода; M_k — крутящий момент; F — площадь, ограниченная средней линией стенок; l_i — длина участка контура; δ_i — толщина участка контура.

Незамкнутые профили обладают значительно более низкой жесткостью на кручение, чем замкнутые.

Деформация станины должна составлять лишь часть допускаемых деформаций, отнесенных к инструменту (не более 5—10%), поскольку главную роль играет жесткость суппорта или стола. Например, для токарных станков следует подсчитать суммарное перемещение резца f_r в радиальном направлении, в результате деформации станины

$$f_z = f_r + \varphi H, \quad (52)$$

где f_r — деформация станины от изгиба в горизонтальной плоскости под резцом; φ — угол закручивания станины в сечении под резцом; H — расстояние от оси станины до линии центров станка.

При упрощенных расчетах станин можно вместо деформаций определить наибольшие напряжения, которые не должны превосходить 1000—12 000 Н/см². Такие низкие значения напряжений диктуются условием длительного сохранения точности станин и косвенно учитывают условие жесткости. К станине крепят неподвижные корпусные детали — стойки, корпуса коробок скоростей, которые совместно с поддерживающими деталями (поперечины, перекладины, хоботы и т. п.) образуют основной контур станка. Подвижные корпусные детали составляют основу тех элементов станков, которые предназначены для закрепления и рабочего перемещения обрабатываемой детали (столы фрезерных, строгальных, расточных, шлифовальных станков, планшайбы карусельных, зубофрезерных станков) или для установки и рабочего перемещения режущего инструмента (суппорты токарных, револьверных, зубофрезерных станков, ползуны поперечно-строгальных и долбежных станков).

Все эти элементы имеют направляющие прямолинейного или кругового

движения, которые играют большую роль в обеспечении точности и долговечности станка.

§ 3. Направляющие станков

В станках применяются направляющие скольжения и качения как для прямолинейного, так и для кругового перемещения. Конструктивные формы направляющих скольжения весьма разнообразны. Если поверхности скольжения образуют охватываемый профиль (рис. 85,а), то на них плохо удерживается смазка, и поэтому такие направляющие чаще применяют при медленных перемещениях по ним суппортов или столов. Их преимущество — более простое изготовление, а также то, что на них не удерживается попавшая стружка. Охватывающие направляющие (рис. 85,б) более пригодны для высоких скоростей скольжения, так как хорошо удерживают смазку. Однако направляющие необходимо надежно защищать от попадания стружки и от загрязнения.

Прямоугольные направляющие просты в изготовлении, но плохо удерживают смазку и легче засоряются. Их применяют для медленных перемещений, например, силовых головок агрегатных станков. Треугольные (призма-

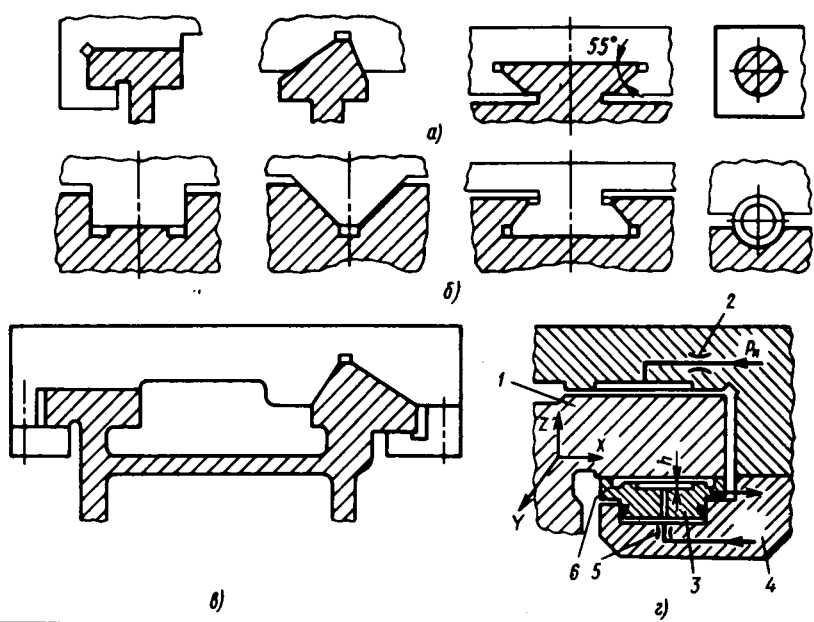


Рис. 85. Основные типы профилей направляющих скольжения

тические) направляющие применяют при симметричной нагрузке и малых скоростях перемещения. V-образные направляющие пригодны для больших скоростей, например для столов строгальных станков. Направляющие в виде ласточкина хвоста удобны тем, что достаточно четырех плоскостей скольжения, чтобы воспринимать нагрузки во всех направлениях, включая опрокидывающие моменты. Однако они сложны в изготовлении, обладают недостаточной жесткостью применяются обычно для малых скоростей перемещения и средних требований к точности. Комбинированные направляющие представляют собой сочетание плоской и треугольной (или призматической) направляющих (рис. 85, в). Для вращения планшайб и столов станков применяют плоские, конические и V-образные направляющие скольжения.

Для смазки направляющих, которая способствует значительному увеличению их долговечности, применяют разнообразные методы. Для распределения масла по всей поверхности трения на направляющих выполняют специальные смазочные канавки. Гидростатическая смазка направляющих скольжения может обеспечить жидкостное трение во всем диапазоне скоростей и нагрузок. Для избежания «всплывания» стола или суппорта на направляющих станины применяют замкнутые гидростатические направляющие с подачей смазки на основную и нижнюю грань, воспринимающую опрокидывающий момент. В замкнутых гидростатических направляющих 1 нижняя опора 3 выполнена плавающей, она установлена на планке подвижного узла 4 (рис. 85, г). Масло под давлением p_n через соответствующие дроссели 2 и 5 подают на верхние и нижние поверхности направляющих. Плавающая опора может перемещаться в направлении оси Z и поворачиваться относительно осей X и Y, что обеспечивает возможность регулировать значения зазора h . Применяют также метод, когда один из буртиков 6 плавающей опоры постоянно контактирует с направляющей 1 станины. Направляющие такого типа длительно сохраняют точность, не чувствительны к деформациям станины и изменениям направления движения стола. Их целе-

сообразно применять для тяжелых станков.

Коэффициент трения аэростатических направляющих очень мал — до 0,0005, зазор в направляющих 2—4 мкм, а жесткость более 100 Н/мк. Чем меньше объем подводящего кармана (канавки), тем устойчивее аэростатические опоры. Основным критерий работоспособности направляющих — их износостойкость. Они должны длительное время сохранять начальную точность. На износостойкость направляющих действует много различных факторов, главными из которых являются материал направляющих и их термообработка, давления и их распределение по граням и по длине направляющих, условия работы (смазка, загрязнение и др.), характер перемещения суппорта или стола (скорость, величина хода). Направляющие обычно работают в условиях малых и средних скоростей скольжения (до 1,5 м/с) с небольшим давлением (до 1 мПа).

Для расчета направляющих скольжения необходимо знать характер эпюры давлений между гранями направляющих. Если в направляющей действует сила (реакция) A , которая смещена от середины на величину x_A , то при линейной эпюре давлений значение наибольшего p_1 и наименьшего p_2 давлений можно подсчитать по формулам

$$p_1 = \frac{A}{al_0} \left(1 + 6 \frac{x_A}{l_0} \right), \quad p_2 = \frac{A}{al_0} \left(1 - 6 \times \frac{x_A}{l_0} \right), \quad (53)$$

где a — ширина, l_0 — длина направляющих.

В общем виде эпюра давления имеет вид трапеции. При $x_A = 0$, т. е. при приложении силы в центре направляющих, $p_1 = p_2 = \frac{A}{al_0} = p_{cp} = \text{const}$, т. е. получим прямоугольную эпюру. При $x_A = \frac{1}{6} l_0$ $p_2 = 0$ и $p_1 = 2p_{cp}$ — эпюра давлений треугольная. При $x_A > \frac{l_0}{6}$ получим неполное касание по длине направляющих (раскрытие стыка), что является весьма нежелательным. Таким образом, величина эксцентриситета силы A влияет на характер эпюры давлений.

При перемещении суппорта (или сто-

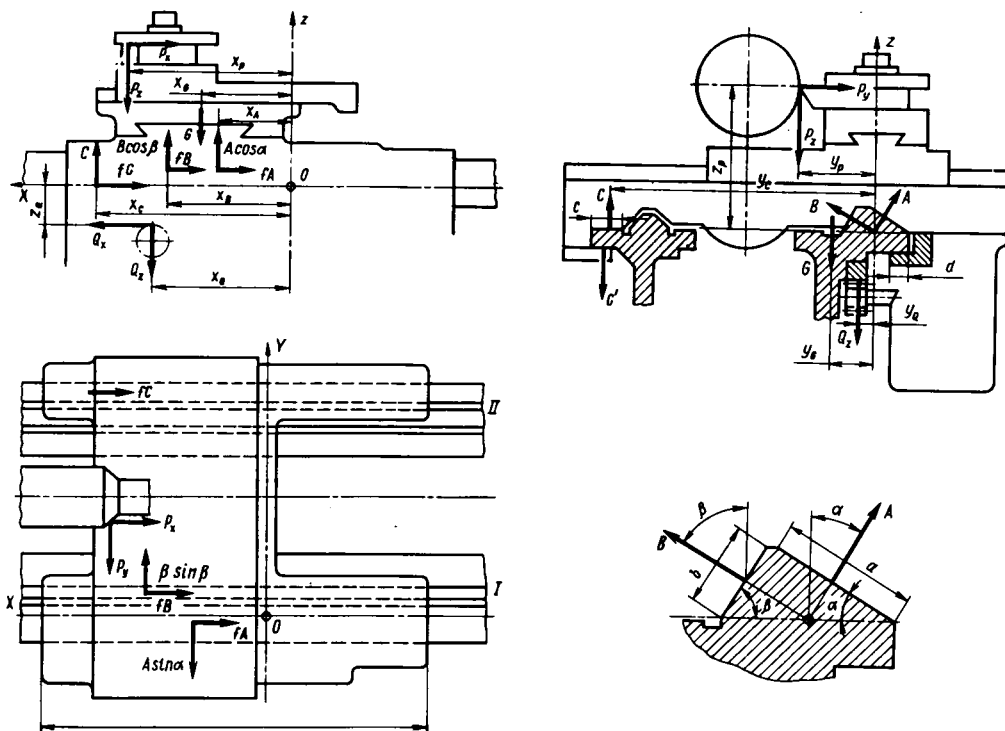


Рис. 86. Схема для расчета сил, действующих в направляющих суппорта

ла) по направляющим станины на него действуют силы резания (P_x, P_y, P_z), сила тяги Q , перемещающая суппорт, и сила веса суппорта G . В результате действий этих внешних сил в направляющих возникают реакции, которые и определяют эпюру давлений в каждой направляющей.

Рассмотрим методику определения удельных давлений в направляющих на примере направляющих токарного станка (рис. 86). Оси координат совпадают с направлением соответствующих составляющих сил резания, а начало координат выбрано в точке пересечения реакций на треугольной направляющей, а по длине — в середине направляющих. Проектируя все силы на оси и беря сумму моментов относительно осей, напишем уравнение статики:

$$\left. \begin{aligned} \sum X &= -P_x + Q_x - (A + B + C) \times f = 0; \\ \sum Y &= B \sin \beta - A \sin \alpha - P_y = 0; \\ \sum Z &= B \cos \beta + A \cos \alpha + C - P_z - G - Q_z = 0; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \sum M_x &= P_y z_p + C y_c - P_z y_p - G y_g = 0; \\ \sum M_y &= P_x z_p + Q_x z_q - P_z x_p - Q_z x_q - G x_g + A \cos \alpha x_A + B \cos \beta x_B + C x_c = 0; \\ \sum M_z &= -P_y x_p - A \sin \alpha x_A + P_x y_p + B \sin \beta x_B + C f y_c = 0, \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

где f — коэффициент трения, $f = 0,1 \div 0,2$ при малых скоростях перемещения (токарные, фрезерные станки), $f = 0,05 \div 0,08$ — при больших скоростях перемещения и хорошей смазке (строгальные, шлифовальные станки).

При записи уравнений (54) координаты приложения сил обозначены через x, y, z с индексом соответствующей силы. Неизвестными в данной системе являются реакции в направляющих A, B и C ; сила тяги Q и координаты приложения реакций x_A, x_B, x_C . Поэтому имеются семь неизвестных и задача является статически неопределимой. Все силы могут быть определены из первых четырех уравнений, так как в них не входят искомые координаты, и,

следовательно, можно определить средние удельные давления p_{cp} на всех трех гранях. В некоторых случаях при приближенных расчетах этим можно ограничиться. Однако для определения максимальных давлений и, главное, характера эпюры (имеется ли раскрытие стыка) необходимо полное решение статически неопределимой задачи и определение координат x_A , x_B и x_C . Дополнительное уравнение может быть получено, если установить распределение внешних опрокидывающих моментов M_y^B между направляющими.

Пятое уравнение в системе (54) можно представить как состоящее из момента внешних сил M_y^B (опрокидывающий момент) и реактивных моментов, действующих в направляющих:

$$M_y^B = -(P_x z_P - P_z x_P + Q_z z_Q - Q_z x_Q - Gx_G). \quad (55)$$

Поскольку M_y^B — известная величина, это уравнение примет вид

$$M_y^B = Ax_A \cos \alpha + Bx_B \cos \beta + Cx_C. \quad (56)$$

Чтобы получить дополнительное уравнение, необходимо установить, как этот момент распределяется между передней и задней направляющими с учетом деформаций суппорта (стола) или направляющих. Для этого момент M_y^B разбивается на два опрокидывающих момента: $M_y^B = M_y^I + M_y^{II}$:

$$M_y^I = A \cos \alpha x_A + B \cos \beta x_B. \quad (57)$$

$$M_y^{II} = Cx_C.$$

Если известно соотношение между M_y^I и M_y^{II} , то задача становится статически определимой. Для достаточно жестких салазок и направляющих, нагруженных относительно равномерно, можно считать, что момент распределяется между направляющими I и C пропорционально их ширине, т. е.

$$\frac{M_y^I}{M_y^{II}} = \frac{l}{C}, \quad (58)$$

$$\left. \begin{aligned} M_y^I &= M_y^B \frac{l}{l+C}; \\ M_y^{II} &= M_y^B \frac{C}{l+C}. \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

При расчете треугольной направляющей определяют ее приведенную ширину $e = a \cos^2 \alpha + b \cos^2 \beta$.

После решения уравнений (54) и (57) определяется характер эпюр давлений и значения максимальных давлений $p_1 = p_{max}$, которые не должны превосходить допускаемых. Допускаемые значения p_{max} получены из практики работы станков и соответствуют условиям длительной работы направляющих при нормальных условиях эксплуатации. Для чугунных направляющих $p_{max} = 250 \div 300$ Н/см² при малых скоростях скольжения (подачи) и до 80 Н/см² при больших скоростях скольжения (скорости резания). Для шлифовальных станков, работа которых происходит в неблагоприятных условиях с точки зрения абразивного износа, $p_{max} = 5 \div 8$ Н/см². Для тяжелых станков эти значения понижаются в 2 раза, так как ремонт направляющих этих станков весьма сложен. При расчете по средним удельным давлениям допускаемые значения p_{max} снижаются в 2 раза.

Данный расчет позволяет оценить условия, в которых работают направляющие, с точки зрения распределения и величины удельных давлений. Этим косвенно учитывается износ, который зависит и от удельного давления. Большое значение имеет расчет направляющих скольжения на износ, который рассмотрен в гл. 19. Для этого расчета также необходимо знать уравнение эпюры давлений.

В станках находят применение также направляющие качения, где трение скольжения заменяется трением качения шариков или роликов по закаленному направляющим (планкам) станины и стола или суппорта. Характерно применение направляющих качения в координатно-расточных, шлифовальных, копировальных, карусельных и других станках. При этом имеет место значительное уменьшение сил трения (коэффициент трения покоя для направляющих качения в 20 раз меньше, чем для направляющих скольжения), исключение прерывистого движения, вызванного при скольжении эффектом прилипания и уменьшения износа сопряжения.

Наиболее распространенные варианты направляющих качения показаны на рис. 87: a — шариковые; b — роли-

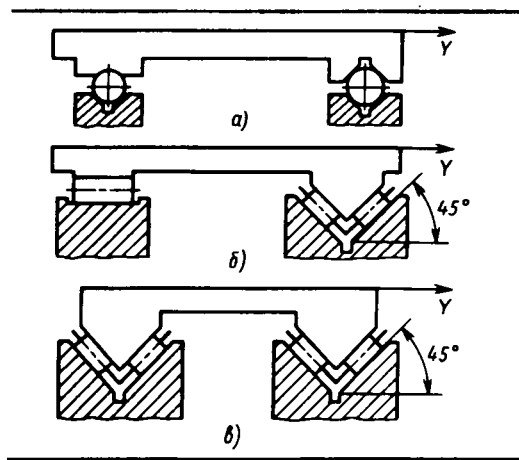


Рис. 87. Направляющие качения стола

ковые комбинированные; в — роликовые призматические. Так как при движении стола осуществляется качение шариков или роликов по направляющей станины, они проходят лишь половину того расстояния, на которое перемещается стол станка. Это заставляет делать длину сепаратора с телами качения короче длины стола на половину его хода. Если необходимо обеспечить большее перемещение стола, шарики подаются в специальные желобки, в которых они перемещаются в обратном направлении, непрерывно циркулируя по замкнутому контуру, находясь в верхней части в ненагруженном состоянии. Направляющие качения для планшайб выполняются в виде обычных или специально выполненных подшипников качения. Направляющие качения, как правило, рассчитывают по формулам для контактных напряжений и деформаций по теории Герца-Беляева.

При работе направляющих качения желательно создать условия для более длительной их работы с малым износом (смятием) и большим сроком службы до наступления усталости поверхностных слоев у тел качения. Поэтому допускаемые напряжения, выбираемые по общим правилам, занижаются и составляют, например, для роликовых направляющих точных станков (координатно-расточных, шлифовальных) 100—150 МПа.

С точки зрения контактной жесткости направляющие скольжения и шариковые направляющие качения примерно равноценны. Но на жесткость направляющих качения сильное влияние оказывает предварительный натяг. Направляющие качения позволяют осуществлять малые установочные перемещения с высокой точностью. При достаточно высокой жесткости привода (выше 30—40 Н/мкм) погрешность установки характеризуется величинами порядка 0,1—0,2 мкм. При малой жесткости привода точность установки понижается.

Для повышения долговечности направляющих всех типов и уменьшения влияния их износа на точность обработки применяют разнообразные методы, и в первую очередь следующие: использование износостойких материалов (легированных термообработанных сталей и чугунов); смазку направляющих; компенсацию износа (применение регулируемых планок и клиньев для направляющих скольжения); применение защитных устройств от попадания пыли и стружки (щитки, уплотнения); выбор рациональных конструктивных форм и размеров.

Глава 12 Механизмы станков

§ 1. Механизмы перемещения рабочих органов станка

Для привода тех рабочих органов станка, которые должны обеспечить сложный закон движения, применяются многозвенные шарнирные, кулисные и кулачковые механизмы. Они осуществляют возвратно-поступательное дви-

жение без применения реверсивных механизмов. Многозвенные шарнирные механизмы применяются редко, так как трудно получать и изменять необходимый закон движения ведомого звена, а большое число сочленений уменьшает жесткость механизма. Кулисные механизмы, которые обеспечивают плавность движения и большую скорость при обратном холостом ходе, приме-

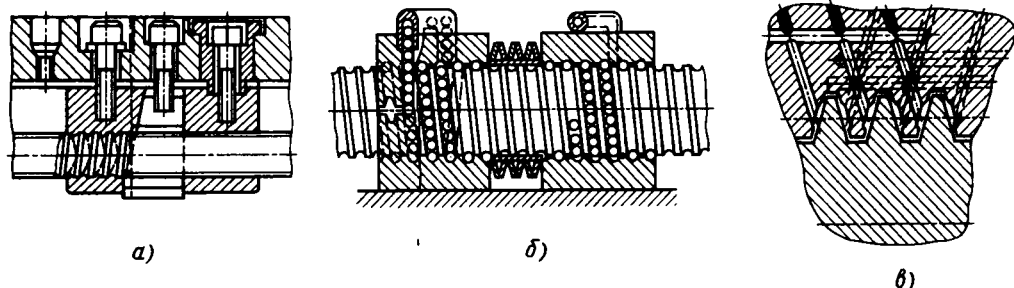


Рис. 88. Винтовые пары станков:

а — скольжения; б — качения; в — гидростатического трения

няют, например, в поперечно-строгальных станках для привода ползуна. Кулачковые механизмы широко применяют для привода суппортов в станках-автоматах. Большинство рабочих органов станка перемещается возвратно-поступательно с постоянной скоростью рабочего движения v . Поскольку ведомый вал привода имеет вращательное движение, необходимо иметь механизмы, преобразующие его в возвратно-поступательное движение. Наиболее распространенными механизмами для этой цели являются ходовой винт — гайка и рейка с реечной шестерней. Передачу винт — гайка применяют для медленных точных перемещений в качестве последнего звена цепи привода столов и суппортов многих станков. Возможность выполнения этой пары с высокой точностью и большое передаточное отношение позволяют использовать винтовую пару также и для отсчета величины перемещений. Типичные конструкции ходовых винтов показаны на рис. 88. Обычно применяют пару скольжения (рис. 88, а) с трапециoidalным профилем резьбы с углом 30° , который более технологичен и допускает применение разъемных маточных гаек. Для высокоточных ходовых винтов применяют также прямоугольную резьбу. Пару винт — гайка рассчитывают по допускаемым давлениям $p_{\text{доп}}$ в витках, так как должна быть обеспечена высокая износостойкость пары. Значение $p_{\text{доп}}$ выбирают в пределах 2—3 МПа для точных ходовых винтов и 5—12 МПа для обычных случаев. Более высокие значения допускаемых удельных давлений относятся к бронзовым гайкам.

Прочность ходовых винтов обычно не определяет его размеров, однако длинные ходовые винты должны быть проверены на устойчивость в отношении продольного изгиба. Для точных ходовых винтов рассчитывают ошибки в перемещении, возникающие в результате деформации винта.

При действии на винт осевой силы Q и крутящего момента M_k он растягивается (или сжимается) и скручивается. В результате при некотором числе оборотов винта гайка переместится на длину, отличающуюся от расчетной l на величину деформации данного участка винта Δ .

При определении ошибки Δ_k , вызванной деформацией кручения, можно считать, что эта ошибка во столько раз меньше шага винта t , во сколько раз угол закручивания φ меньше угла 2π радиан, т. е. $\Delta_k = t \frac{\varphi}{2\pi}$. Наибольшая ошибка перемещения, вызванная деформацией кручения и растяжения (сжатия),

$$\Delta = \frac{Ql}{EF} + \frac{M_k l}{GJ_p} \frac{t}{2\pi}, \quad (60)$$

где E , G — модули упругости 1-го и 2-го рода; F , J_p — площадь поперечного сечения и полярный момент инерции сечения винта; l , t — длина перемещения и шаг винта.

Применение обычных конструкций ходовых винтов в приводе точных перемещений столов с частыми изменениями направления движений не всегда обеспечивает требуемую точность из-за зазоров в паре. Кроме того, потери на трение в винтовой паре доста-

точно велики. Поэтому в станках с программным управлением и в прецизионных станках, где требования точности имеют первостепенное значение, получила распространение шариковая пара качения (рис. 88, б). Шарики катятся по канавкам ходового винта и гайки. Для обеспечения чистого качения шарики постоянно циркулируют, попадая при движении винта в специальный желоб, который направляет их к другому концу гайки. Расчет шариковой передачи винт — гайки ведут из условия контактной прочности тел качения (по формулам Герца). Допускаемое напряжение при твердости контактирующих поверхностей $HRC\ 60$ порядка $(2,5-3)10^3$ МПа. При расчетах следует учитывать, что соотношение радиусов шарика и канавки обычно равно 0,96, что обеспечивает достаточно высокий КПД передачи. В передачах качения создают предварительный натяг, который повышает точность и жесткость передачи, но увеличивает нагрузку в механизме. Его создают с помощью пружины (рис. 88, б), либо за счет применения шариков большего размера, чем номинальный. Для расчета осевой деформации δ_n (мкм) при натяге и увеличения для этой цели номинального диаметра шарика на Δd (мкм) можно пользоваться приближенными формулами

$$\delta_n = 1,3 \sqrt[3]{\frac{P_n^2}{d}}; \Delta d = 0,45 \sqrt[3]{\frac{P_n^2}{d}}, \quad (61)$$

где P_n — нормальная сила предварительного натяга, Н; d — диаметр шарика, мм.

Для перемещения узлов тяжелых станков применяют гидростатические передачи винт — гайка (рис. 88, в). Между витками передачи создается масляный слой. Этим исключается износ пары, и КПД передачи повышается до 0,98—0,99. Жесткость масляного слоя при определенных условиях может превысить контактную жесткость обычной передачи. При замене дросселей гидравлическими регуляторами жесткость слоя можно повысить более чем в 5 раз. Гидростатическая передача винт — гайка фактически является беззазорной, так как давление существует с обеих сторон витков. Передача

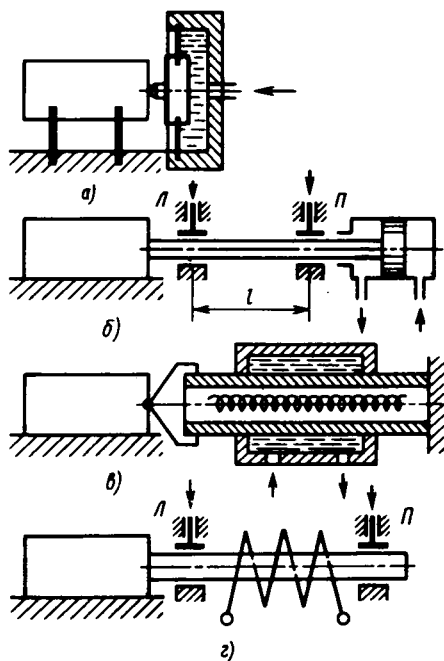


Рис. 89. Механизмы малых перемещений: а, б — упругосиловой; в — термодинамический; г — магнитострикционный

обеспечивает высокую равномерность движения.

В качестве модификации обычной винтовой передачи в станках применяют механизм в виде короткого винта (червяка) и длинной гайки (рейки).

Характерную для металлорежущих станков группу механизмов представляют собой устройства для малых перемещений (микроподач) при финишной обработке. Эти механизмы могут обеспечить очень малые подачи или импульсные перемещения (до десятых долей микрометра), благодаря чему достигается высокое качество обработанной поверхности и точность обработки. Кроме обычных механизмов, приспособленных для этих целей, применяют специальные конструкции, основанные на использовании деформации передающих звеньев (в станках шлифовальной группы).

На рис. 89 приведены типовые схемы приводов малых перемещений. Перемещения упругосилового привода (рис. 89, а) происходят благодаря деформации упругого звена (например, плоских пружин) или, иногда, самого корпуса механизма. Сила на исполни-

тельном звене со стороны привода может быть создана различными способами, например, гидроцилиндром с мембраной. Этот метод обеспечивает перемещение лишь на небольшую величину. Если надо увеличить ход механизма, в системе подачи используют упругий стержень (рис. 89, б), который поочередно зажимают специальными зажимами L и P (левый и правый). При включении зажима L стержень сжимается от гидроцилиндра, после чего включается зажим P , а L освобождается. В результате стержень восстанавливает свою длину l и происходит перемещение ведомого звена на величину Δl , зависящую от его длины, сечения и силы, создаваемой гидроцилиндром. Последовательное включение зажимов L и P обеспечивает импульсное перемещение ведомого звена.

В термодинамическом приводе (рис. 89, в) использовано тепловое расширение стержня, связанного с ведомым звеном и неподвижной частью станка. Внутри стержня (трубки) помещен нагревательный элемент (после перемещения его необходимо охладить). Здесь возможно перемещение на небольшую величину с большой точностью и жесткостью. Недостаток привода — его инерционность и необходимость теплоизоляции и охлаждения.

Большими преимуществами обладает магнестрикционный привод (рис. 89, г), в конструкции которого использован эффект изменения длины стержня из ферромагнитного материала под действием магнитного поля. Обычно применяют конструкцию с зажимами, аналогично описанному выше. Привод обладает малой инерционностью, большой жесткостью, стабильностью работы. Его используют как в приводах малых перемещений, так и в системах автоматической подналадки, например для компенсации износа режущего инструмента.

Для непрерывного кругового перемещения (вращения или поворота на некоторый угол) в делительный и других кинематических цепях, где требуется высокая точность передачи, в качестве последнего звена обычно применяют прецизионную червячную пару. В этом случае используют ее важное свойство — самоторможение. Эта пара

задерживает распространение колебаний в системе привода. Механизмы периодического поворота столов и шпиндельных барабанов рассмотрены в гл. 35.

§ 2. Механизмы изменения скоростей

Для осуществления данного технологического процесса в течение каждого цикла обработки требуется изменение скоростей рабочих органов станка, изменение величины и направления скорости, включение и выключение движения с последующим торможением. Одним из наиболее распространенных способов изменения скоростей в приводах станков является применение передвижных блоков зубчатых колес (см. гл. 9). При этом достигаются простая конструкции, высокий КПД привода и точное передаточное отношение. Недостатком этого метода является недопустимость переключений при быстром вращении колес и износ торцов зубьев.

В станках широко применяют фрикционные муфты, которые обеспечивают плавность включения и возможность переключать скорость на ходу. Наибольшее распространение получили многодисковые фрикционные муфты; их применяют в приводах главного движения и подачи, особенно в автоматизированных станках, где требуется быстрое переключение скоростей от механизмов управления. Особенно удобны для этой цели электромагнитные муфты. С фрикционной муфтой нередко блокирован тормоз, который гасит инерцию выключенных механизмов. Конструкции станочных фрикционных муфт разнообразны. Основные типы муфт нормализованы. Более длительное время без компенсации износа могут работать электромагнитные муфты. Фрикционные муфты рассчитывают по методике, рассматриваемой в курсе «Детали машин». При оценке крутящего момента его умножают на динамический коэффициент K_d , учитывающий характер нагрузки в станке: при работе почти без ударов (небольшие станки) $K_d = 1,5$; при работе со слабыми ударами (станки средних размеров) $K_d = 1,9$; при ударах средней силы (строгальные станки) $K_d = 2,4$; при сильных ударах (тяжелые продольно-строгальные станки) $K_d = 2,8$.

Реверсивные механизмы, предназначенные для изменения направления вращения, должны работать с минимальными потерями энергии, особенно при частом реверсировании, затрачивать малое время на реверс при допустимых значениях инерционных нагрузок в приводе.

Реверсирование может быть осуществлено электродвигателем, что упрощает механическую часть станка и управление процессом. Если необходимо изменить направление движения лишь части кинематической цепи станка, применяют специальные механизмы реверса. При большой частоте реверса реверсирование электродвигателем нецелесообразно. Реверсивные механизмы (трэнзели) разнообразны по своей конструкции. Для быстровращающихся валов обычно применяют фрикционные муфты.

С точки зрения затраты энергии на реверсирование более целесообразно вначале осуществить процесс торможения, т. е. довести скорость ведомого вала до нуля, и лишь затем осуществить его разгон до необходимой скорости.

Потерю энергии при реверсировании можно характеризовать работой трения A_r (работа буксования), которая, в свою очередь, зависит от нагрузок, действующих на ведущем и ведомом валах, и от сил инерции. Если приближенно считать, что скорость ведущего вала сохраняется постоянной: $\omega_1 = \text{const}$, и включение муфты производится на холостом ходу, т. е. без рабочей нагрузки, то будет преодолевать инерция включаемой части кинематической цепи и $A_r = \frac{1}{2} J_n (\omega_1 - \omega_2)^2$, где J_n — приведенный момент инерции вращающихся масс включаемого вала; ω_2 — угловая скорость ведомого вала до включения муфты.

Пусть, например, необходимо изменить скорость вала на обратную той же величины, т. е. $\omega_2 = -\omega_1$. При непосредственном реверсировании вала

$$A_r = \frac{J_n}{2} (\omega_1 - \omega_2)^2 = 2J_n \omega_1^2. \quad (62)$$

При торможении вала, а затем разгоне до скорости ω_2

$$A_r = \frac{1}{2} J_n \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_n \omega_2^2 = J_n \omega_1^2. \quad (63)$$

Таким образом, потеря энергии за весь период реверсирования во втором случае вдвое меньше. Появление высокомоментных регулируемых электродвигателей вытесняет в настоящее время применение фрикционных вариаторов. Бесступенчатое регулирование скоростей поступательного движения в приводах подачи осуществляют с помощью гидропривода (см. гл. 25).

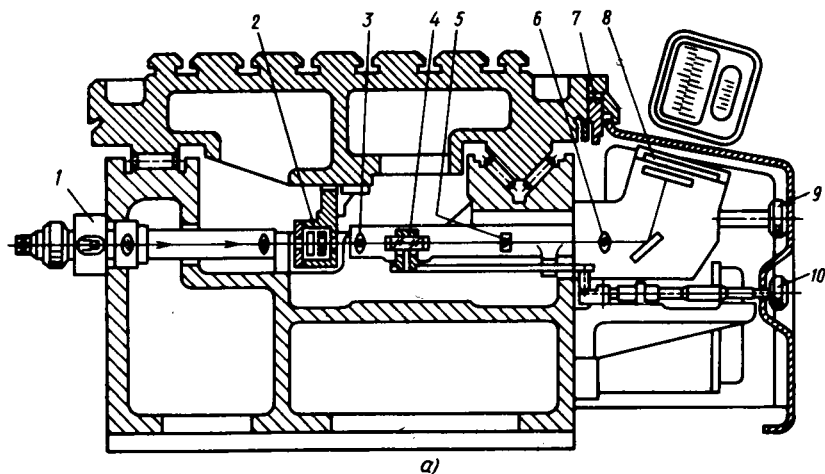
§ 3. Механизмы обеспечения точности обработки

В станках применяют специальные механизмы, предназначенные для обеспечения требуемой точности обработки и сохранения этой точности в течение длительного времени. К ним относятся коррекционные механизмы, механизмы отсчета, механизмы закрепления столов и бабок на время обработки, механизмы регулирования и компенсации износа и другие.

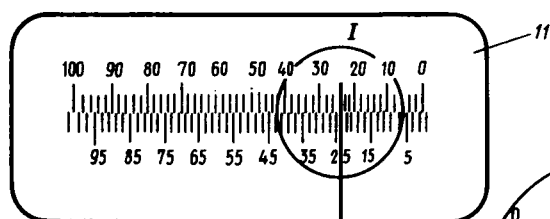
Отсчетные механизмы обеспечивают с заданной точностью необходимое взаимное положение элементов станка несущих инструмент и заготовку суппортов, столов, шпиндельных бабок и др. Наиболее распространенным отсчетным устройством на механической основе является ходовой винт, снабженный лимбом и нониусом. Зная шаг винта по числу его оборотов и числу делений лимба, можно определить линейное перемещение суппорта или стола. В данном случае ходовой винт выполняет две функции — он служит и механизмом, преобразующим вращательное движение в поступательное, а также и механизмом отсчета. Поэтому его деформация и износ влияют на точность отсчета.

Для разделения функций перемещения и отсчета применяют электромеханические, оптические и другие бесконтактные отсчетные устройства.

Оптическое отсчетное устройство продольного хода стола координатно-расточного станка мод. 2Д450 приведено на рис. 90, а. Со столом соединена



а)



б)

Рис. 90. Схема оптического отсчетного устройства (а) - координатно-расточного станка мод. 2Д450 и шкалы, проектируемые на экран (б)

точная стеклянная шкала 2 (продольный масштаб) с 1000 делениями через каждый миллиметр. Шкалу подсвечивают осветителем 1. Ее изображение через объектив 3 призмы 4, плоскопараллельную пластинку 5 и линзу 6 проецируется с увеличением на матовый экран 8. Для оценки сотых долей миллиметра в плоскости экрана имеется шкала 11 (рис. 90, б) со 100 делениями. Для получения отсчета с точностью до 0,001 мм на экране имеется дополнительная шкала 12 (рис. 90, б), которую можно смещать маховиком 9. В устройстве имеются также коррекционная линейка 7 и маховичок 10 приведения отсчета к нулю перемещением призмы 4.

На рис. 90, б показан пример отсчета, когда показания шкал соответствуют

установленному размеру 73, 245 мм.

При применении механизмов отсчета в автоматизированных станках они должны быть приспособлены не только для регистрации величины данного перемещения, но и для подачи сигнала в систему управления. Наиболее удобны для этого датчики, преобразующие линейное перемещение в электрический сигнал: потенциометры, индуктивные и фотоэлектрические. Последние являются дальнейшим развитием оптических систем.

Механизмы для обеспечения точности положения и движения рабочих органов станков включают механизмы коррекции, зажима столов и траверс, точной фиксации и др. Основная идея этих устройств заключается в том, что измеряют ошибки данного меха-

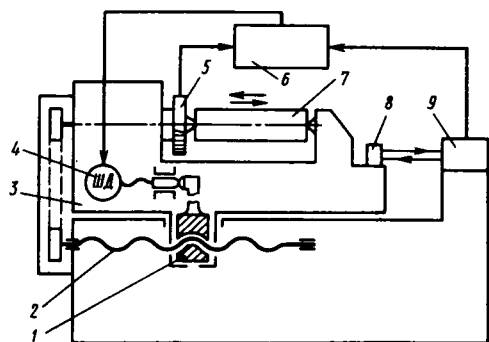


Рис. 91. Схема механизма коррекции с лазерным интерферометром

низма перемещения, а затем специальный механизм коррекции исправляет данные ошибки. Для ходовых винтов корректирующий механизм представляет собой линейку, расположенную вдоль станка, профиль которой учитывает ошибки в шаге винта. Поворотом винта или гайки на небольшой угол столу или суппорту сообщается такое дополнительное осевое перемещение, чтобы в сумме с перемещением от винта суппорт получал ход, соответствующий идеальному ходовому винту.

Схема механизма коррекции, в котором использовано лазерное устройство для оценки точности перемещения стола прецизионного станка, приведена на рис. 91. Вращение шпинделя с деталью 7 и перемещение стола 3 с помощью ходового винта 2 должны осуществляться с соблюдением точного передаточного отношения. Блок 6 сравнения и переработки информации получает сигналы от углового измерительного преобразователя 5 и лазерного интерферометра 9. Последний, используя отражатель 8, помещенный на движущемся столе, с высокой точностью определяет положение стола в любой момент времени. При отклонениях от требуемого передаточного отношения блок 6 подает команду на механизм корректирования, который через шаговый электродвигатель 4 командует дополнительным поворотом гайки 1 на небольшой угол, что вносит необходимую поправку в движение стола.

Столы, траверсы, шпиндельные баб-

ки, которые должны быть неподвижными в процессе обработки, необходимо закреплять на направляющих после их перемещения. Для этого применяются специальные механизмы зажима подвижных элементов станка, которые обеспечивают более высокую контактную жесткость подвижных стыков и виброустойчивость системы. В станках с программным управлением включение механизмов зажима происходит автоматически и обеспечивает точное положение рабочего органа. Расчет механизмов зажима столов и траверс следует производить из условия, что сила зажима должна обеспечить неподвижное положение механизмов при обработке. Прижимные поверхности механизма должны быть расположены так, чтобы сила зажима не искажала его положения, не приводила к перекосу. Эпюра давлений на рабочих направляющих от силы зажима должна приближаться к прямоугольной форме. Механизмы точной фиксации поворотных узлов рассмотрены в гл. 35.

Механизмы для регулирования и компенсации служат для начальной отладки станка и для ликвидации вредных воздействий, вызванных деформацией и износом элементов станка. Примерами таких устройств могут служить регулирующие клинья направляющих, конструкции для регулирования зазора и натяга в шпиндельных подшипниках и др.

Наиболее прогрессивным методом компенсации изменившихся параметров станка является применение методов автоматической компенсации, когда в станке предусмотрены механизмы, которые без участия рабочего поддерживают требуемую точность обработки. Они позволяют станку приспосабливаться к изменениям условий работы и восстанавливать утраченные функции.

Более совершенные системы производят, например, автоматическую подналадку при перемещении стола станка, компенсируют последствия упругих деформаций, изменяющихся при перемещении суппорта станка; автоматически устраняют вибрации станка, регулируют силы резания, восстанавливают положение шпиндельной бабки при ее тепловых деформациях; компенсируют износ направляющих, регу-

лируют в них силу трения или толщину масляного слоя.

В станках применяют также механизмы компенсации износа инструмента, поскольку быстрый износ режущего инструмента является препятствием для повышения производительности и сохранения точности обработки. Это особенно относится к абразивному инструменту (шлифовальным кругам), который изнашивается весьма интенсивно. Во многих станках (например, внутришлифовальных) правка круга автоматизирована и осуществляется как элемент цикла станка.

§ 4. Механизмы ручного управления станком

Механизмы управления станком предназначены для пуска и останова отдельных узлов и всего станка, включения требуемых скоростей и подач, быстрых подводов и отводов механизмов и для выполнения всех тех функций по изменению характера движения инструмента и заготовки, которые требуются для осуществления данного технологического процесса.

Механизмы управления должны обеспечивать быстроедействие, быть по возможности более простыми и малогабаритными. Кроме того, должны быть обеспечены безопасность и удобство управления станком. Конструкция механизмов управления может существенно повлиять на сложность всего станка. В станках применяют ручные и автоматические системы управления. При ручном управлении все переключения цикла осуществляются рабочим. Автоматические системы управления обеспечивают управление циклом станка без участия человека и поэтому являются наиболее прогрессивными (см. раздел 9).

Характерной особенностью развития механизмов управления станками является автоматизация управления с применением электрических, а иногда гидравлических и пневматических методов подачи команд. Часто ручное управление сочетают с элементами автоматического управления отдельными переключениями.

Механизмы ручного управления должны иметь такую конструкцию и рас-

положение на станке, чтобы утомляемость рабочего была минимальной. Для этого необходимо учитывать геометрию и механику человеческого тела и решать вопрос о зоне расположения органов управления, допустимых силах на рукоятках, последовательности переключения. Надо учитывать физиологические особенности человека, например паузы при работе, эффективность воздействий цветовых сигналов (лампочек) и др.

Характерным примером учета физиологических особенностей человека является мнемоничность системы управления, что освобождает рабочего от излишнего напряжения.

Например, при включении движения рабочих органов станка направление включения или перемещения рукоятки должно совпадать с направлением перемещения данного узла.

Для учета геометрии тела человека необходимо исходить из соотношений его роста и размеров конечностей с тем, чтобы избегать наклона корпуса при работе. Нормальный рост человека можно принять $H=1720$ мм. Важно также знать то пространство, которое может обслужить рабочий только за счет рук, не наклоняя плеч и корпуса.

Как показывает анализ, наиболее удобная зона для расположения механизмов управления находится при малых усилиях включения на высоте 900—1200 мм и при больших усилиях — на высоте 700—900 мм.

Наиболее проста многорукояточная система управления. В этом случае для каждого переключения предусмотрен свой орган управления — рукоятка, штурвал. Передаточные звенья от рукоятки к ведомому звену могут быть весьма разнообразными.

В случае небольших осевых перемещений часто применяют качающиеся вилки или рычаги, причем для лучшей компоновки рукояток управления можно помещать две рукоятки на одной оси.

Для уменьшения числа рукояток можно применять однорукояточное управление, когда одной рукояткой производят несколько, а иногда и все переключения в данном узле.

Наиболее удобно кнопочное управление станком. Оно значительно облегчает работу на станке, снижает утом-

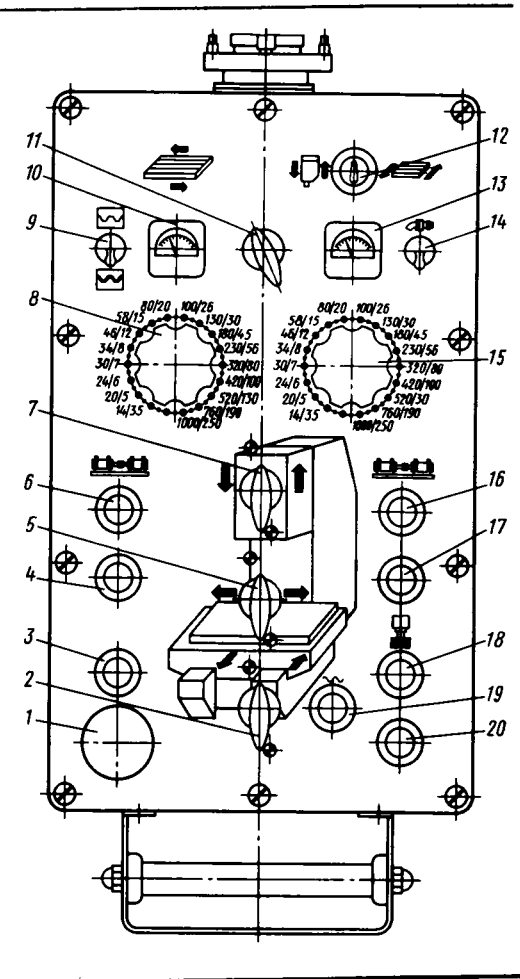


Рис. 92. Подвесной пульт управления вертикально-фрезерного станка мод. 6А56. Команды: 1 — стоп станка; 2, 5 — переключение направления движения стола; 3 — стоп продольных подач стола; 4 — пуск станка; 6, 16 — пуск продольных и поперечных подач; 7 — переключение направления движения фрезерной головки; 8 регуляторы продольных подач стола; 9 — переключатели выбора люфта продольной подачи стола; 10, 13 — амперметры электродвигателей подачи; 11—переключатели перебора; 12 — переключатели выбора работы головки или салазок; 14 — переключатели охлаждения; 15 — регуляторы поперечных подач стола; 17 — стоп перемещения головки; 18 — пуск шпинделя; 19 — быстрое перемещение стола и фрезерной головки

ляемость рабочего, обеспечивает дистанционность управления. Однако в этом случае необходимо, чтобы механизмы привода были приспособлены для такого управления. Применение многоскоростных и регулируемых электродвигателей, электродвигателей для установочных перемещений механизмов или для управления механизмами станка электромагнитных муфт и тормозов, магнитов для подачи различных команд и т. д. позволяет

управлять циклом с помощью кнопок. Пульт управления следует поместить в удобном для рабочего месте, сосредоточив на нем все кнопки управления. В качестве примера на рис. 92 показан подвесной пульт управления универсального вертикально-фрезерного станка мод. 6А56. Для удобства управления на пульте дано схематичное изображение станка и его подвижных элементов рядом с соответствующими кнопками и переключателями.

В станках с ручным управлением начинают также применять характерные для автоматизированного управления устройства цифровой индикации. На специальном электронном табло высвечиваются цифры, указывающие координаты находящегося в данный момент механизма (суппорта, стола), что значительно облегчает управление процессом обработки. Для централизации механизмов ручного управления и применения дистанционного кнопочного управления созданы системы, удобные для автоматизации управления, т. е. создаются предпосылки для перехода к автоматическому управлению станками. Системы управления, как правило, имеют механизмы блокирования, которые не допускают включения таких комбинаций рукояток, которые могут привести к поломкам деталей привода. При кнопочном управлении блокирование обеспечивается электросхемой станка. Для предохранения механизмов станка от поломок из-за возрастания рабочих нагрузок выше допустимых значений или из-за заедания при работе отдельных механизмов в станке предусматриваются специальные устройства, размыкающие данную кинематическую цепь. Механические перегрузочные устройства чаще всего выполняются в виде глухих, кулачковых или фрикционных муфт с элементами, рассчитанными на передачу определенного крутящего момента.

В некоторых моделях станков применяют механизмы, выключающие станок не только при силовых перегрузках, но и при нарушении режимов работы или условий эксплуатации — поломках инструмента, повышении температуры отдельных механизмов, нарушении работы системы смазки, при повышенных вибрациях и т. д.

§ 1. Установка станков на фундаменты и опоры

Легкие и средние станки нормальной точности устанавливают на общее бетонное полотно цеха толщиной 150—200 мм. Положение станка тщательно выверяется уровнями и клиньями, после чего основание станка заливают цементом. Для надежного скрепления с бетонным полотном цеха применяют специальные фундаментные болты. Если в цехе нет бетонного полотна, станок можно установить на отдельную бетонную плиту толщиной до 300 мм.

Точные и тяжелые станки, а также станки, работающие с большими динамическими нагрузками, устанавливают на индивидуальные фундаменты. Между фундаментом и полотном цеха имеется зазор. После установки и выверки станка его станина скрепляется с фундаментом фундаментными болтами.

Индивидуальный фундамент должен обеспечить изоляцию данного станка от других станков и промышленных установок, не допускать передачи вибрации через грунт, способствовать повышению жесткости станины и виброустойчивости станка, обеспечить правильное положение станка при эксплуатации.

Виброизолирующий фундамент 1 прецизионного станка выполнен из армированного железобетона, в котором закреплены три швеллера 2 (рис. 93). Концы швеллеров опираются на пружинные опоры 3, установленные на железобетонном блоке 4. В конструкции фундамента предусмотрена кирпичная кладка 5. Таким образом, фундамент вместе с прикрепленным к нему станком находится в подвешенном состоянии, благодаря чему осуществляется защита станка от воздействий внешних вибраций, имеющих частоту больше 4 Гц.

В обычных случаях индивидуальный фундамент опирается на слой бута или песка, что также способствует виброизоляции станка.

Высота фундамента, опирающегося на грунт, в первом приближении

может быть выбрана исходя из веса фундамента $G_{\text{ф}}$, который для станков с динамической нагрузкой должен быть в 2—3 раза больше веса станка. Площадь основания фундамента F выбирают из условия, чтобы давление на грунт σ_z (Н/см²) и осадка фундамента z (см) не превосходили допустимых значений. Нагрузка на грунт G складывается из веса станка, обрабатываемой детали и самого фундамента.

Допускаемые значения давлений на грунт выбирают в зависимости от типа грунта. Все грунты делят на четыре категории: слабые (I), средние (II), прочные (III) и скальные основания (IV).

Осадка грунта под действием данного давления может характеризоваться коэффициентом упругого равномерного сжатия

$$C_z = \frac{\sigma_z}{z}. \quad (64)$$

Это понятие аналогично жесткости стыка.

Значения допустимого давления на грунт и коэффициента для различных категорий грунтов приведены в табл. 8

Таблица 8

Характеристики прочности и жесткости грунтов

Характеристика	I	II	III	IV
Допускаемое давление на грунт, Н/см ²	До 15	15—35	35—60	Св. 60
Коэффициент C_z , Н/см ³	» 30	30—60	60—100	» 100

В случае скрепления станины с фундаментом следует опасаться тепловых деформаций станины, которые могут возникнуть при колебании температуры окружающей среды. Причины этих деформаций заключаются в том, что коэффициенты линейного расширения материалов фундамента (бетона) и станины (чугуна) различны. При изменении температуры их длина становится

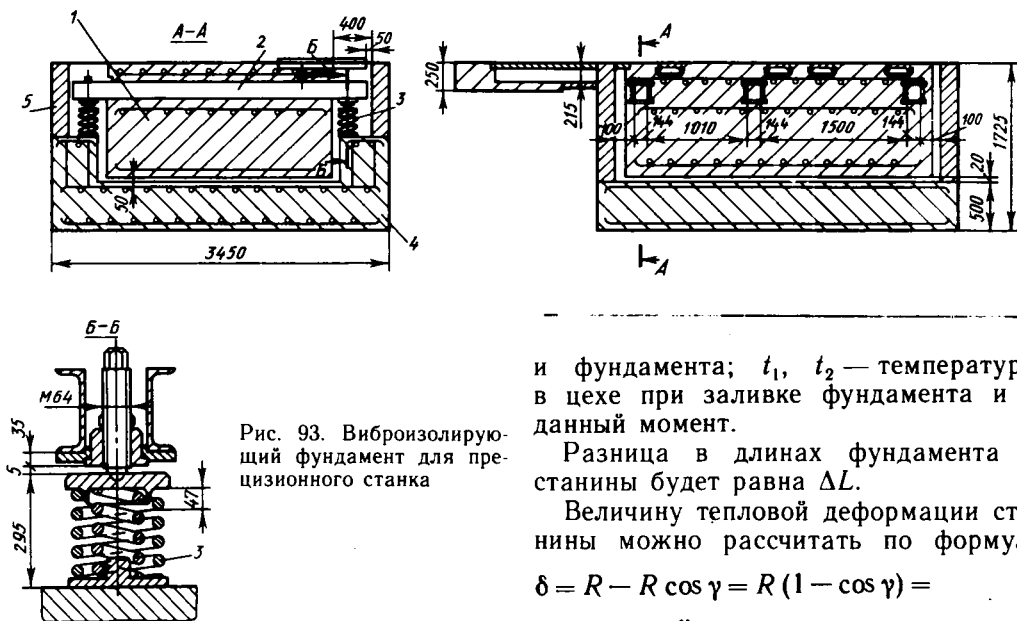


Рис. 93. Виброизолирующий фундамент для прецизионного станка

неодинаковой, и станина изгибается, что влияет на точность обработки.

Расчетная схема для определения тепловых деформаций станины $\delta = O_1C$ приведена на рис. 94.

Станина и фундамент заменены двумя скрепленными пластинами, оси которых проходят через центры тяжести станины O_1 и фундамента O_2 на расстоянии h . Их искривления $A_1O_1B_1$ и $A_2O_2B_2$ произошли в результате того, что каждый метр длины станины и фундамента получил тепловые приращения, разность которых:

$$\Delta = \alpha_{ст}(t_1 - t_2) - \alpha_{ф}(t_1 - t_2) = (\alpha_{ст} - \alpha_{ф})(t_1 - t_2), \quad (65)$$

где $\alpha_{ст}$, $\alpha_{ф}$ — коэффициенты линейного расширения материала станины

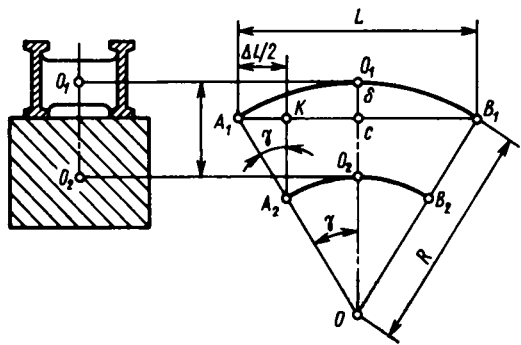


Рис. 94. Расчетная схема для определения тепловых деформаций станины

и фундамента; t_1 , t_2 — температуры в цехе при заливке фундамента и в данный момент.

Разница в длинах фундамента и станины будет равна ΔL .

Величину тепловой деформации станины можно рассчитать по формуле

$$\delta = R - R \cos \gamma = R(1 - \cos \gamma) = 2R \sin^2 \frac{\gamma}{2}.$$

Из $\triangle A_1KA_2: \sin \gamma \approx \gamma \approx \frac{\Delta L}{2h}$; из

$$\triangle OA_1C: R = \frac{L}{2 \sin \gamma}.$$

Подставляя значения γ и $R = OB_1$ получим

$$\delta = \frac{\Delta L^2}{8h}. \quad (66)$$

Данная формула показывает, что чем длиннее станина, тем больше значение искривления направляющих станины δ . Поэтому длинные станины нельзя скреплять с фундаментом по всей длине (для обеспечения возможности свободных тепловых расширений станины).

Широко используют установку станков на виброизолирующие опоры. Эти опоры ослабляют передачу вибраций как от станка к основанию, так и в обратном направлении. Это ослабление происходит в том случае, если частота собственных колебаний станка на упругих опорах в 1,5—2 раза меньше частоты возмущающих сил. При близости или совпадении этих частот, наоборот, произойдет усиление вибраций из-за явления резонанса. Это определяет выбор жесткости виброизолирующих опор (см. гл. 15). Применяют конструкции с различными упругими элементами: металлической сеткой, резиной, пружинами. Конструк-

ция виброопоры для станков средних размеров показана в гл. 15, §2. Частота собственных колебаний прецизионных станков, установленных на виброопоры, не должна превышать 10—15 Гц, а для обычных не выше 20 Гц.

Во избежание резонанса при работе станков с динамическими нагрузками необходимо подсчитать частоту собственных колебаний станка и фундамента или станка на виброопорах. Эта частота должна отличаться от частот периодических сил, действующих на станок. Частота собственных колебаний фундамента зависит от жесткости грунта, которая характеризуется коэффициентом равномерного сжатия грунта. Частота собственных колебаний станины и фундамента в вертикальной плоскости может быть определена по известной формуле

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{z}}, \quad (67)$$

где g — ускорение силы тяжести;
 z — осадка грунта от собственного веса. Кроме того, необходимо определить частоту собственных колебаний станины относительно фундамента, рассматривая станину как балку на упругом основании. В этом случае следует учесть соотношение жесткости сечения станины $E_1 J_1$ и фундамента $E_2 J_2$ и применить формулу

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{z} \left(\frac{J_1 E_1}{J_2 E_2} + 1 \right)}. \quad (68)$$

Если станок установлен на виброизолирующих опорах, то в формуле (68) z будет осадка опорной веса станка.

Желательно, чтобы частота собственных и вынужденных колебаний отличалась более чем в 2,5 раза.

§ 2. Проверка и испытание станков

Пригодность металлорежущего станка к выполнению заданных технологических операций определяется прежде всего исправным состоянием всех его механизмов. Приемку или проверку технического состояния металлорежущих станков начинают с внешнего осмотра станка, проверки его паспортных данных, правильности функциони-

рования его основных механизмов на холостом ходу, а затем под нагрузкой. Для оценки работоспособности станка по основным техническим показателям, и в первую очередь по точности, необходимо провести ряд специальных испытаний. Назначение этих испытаний вытекает из общей схемы потери станком работоспособности (см. гл. 8 и рис. 57), откуда видна необходимость обеспечить высокие начальные параметры станка и сохранять их в процессе эксплуатации. Для опытных образцов станков проводят исследовательские испытания, а для станков, находящихся в эксплуатации, — контрольные.

Испытания станков на геометрическую и кинематическую точность включают проверку точности работы отдельных механизмов и точность изготовления базовых элементов станка. Сюда относится точность вращения (биение) шпинделей, прямолинейность или плоскостность направляющих или поверхностей столов, точность перемещения суппорта или стола, точность ходового винта станка и др. Кроме того, проверяют правильность взаимного положения и движения элементов станка: параллельность или перпендикулярность основных направляющих или поверхностей столов и осей шпинделей, перпендикулярность оси шпинделя координатно-расточного станка плоскости его стола. Проверка точности станков проводится по нормам ГОСТа для соответствующих типов станков. Допустимые значения отклонений зависят также от класса точности станка. При испытании станков на точность применяют универсальные и специальные измерительные приборы и инструменты. Для измерения кинематической точности станков применяют специальные приборы (кинематометры), которые позволяют оценить изменения передаточного отношения, возникающие в основном за счет погрешностей зубчатых передач. Проверка точности кинематических цепей особенно важна для зуборезных станков. Применение получили кинематометры с магнитоэлектрической записью (рис. 95). Прибор измеряет сдвиг электрических фаз сигналов, поступающих с датчиков, установленных на концах контролируемой кинематической цепи с передаточным отношением

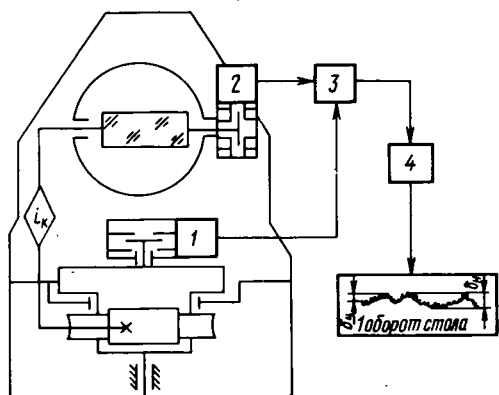


Схема для измерения статической жесткости была приведена на рис. 60. Оценка динамической жесткости и виброустойчивости станка позволяет определить типичные формы колебаний, получить частотные характеристики, установить границы устойчивости работы станка при снятии предельной стружки (см. гл. 17). Главным направлением в развитии методов и средств для испытания станков является их автоматизация, возможность проведения одновременно многих измерений с записью их на цифроречастотные устройства и при необходимости с обработкой полученных данных на ЭВМ.

Испытание станков на технологическую надежность. Технологическая надежность станка — это его способность сохранять качественные показатели технологического процесса (точность обработки и качество поверхности) в течение заданного промежутка времени (см. гл. 20).

Для этого следует проводить испытания станков на технологическую надежность. Эти испытания должны во-первых, установить запас по точности обработки, которым обладает данный станок и, во-вторых, дать прогноз по длительности расходования станком этого запаса точности. Для оценки состояния станков, находящихся в эксплуатации, применяют методы диагностирования, позволяющие выявить механизмы, изменение параметров которых влияет на технические характеристики станка. В настоящее время разрабатываются средства автоматизированной диагностики, в том числе с непрерывным слежением за состоянием станка и в ряде случаев с автоматическим исправлением изменившихся параметров.

§ 3. Ремонт и обслуживание станков

Для поддержания станков в работоспособном состоянии и восстановления утрачиваемых в процессе эксплуатации технических показателей применяется разработанная в Советском Союзе специальная система планово-предупредительного ремонта (ППР). Основные положения этой системы заключаются в следующем.

1. Ремонт оборудования производится через равные, заранее планируемые

Рис. 95. Схема кинематометра

звена настройки i_k . Малую измерительную головку устанавливают на ведущем, быстроходном звене 2, большую головку — на столе 1 станка. Сигналы датчиков усиливаются, сравниваются в электронном блоке 3 и записываются с помощью самопишущего прибора 4 или подаются на осциллограф. На рис. 95 показана осциллограмма записи погрешности передаточного отношения δ_n — за один оборот стола и δ_d — при повороте стола на $1/z$ часть стола, где z — число зубьев делительного колеса стола.

Оценка тепловых деформаций станка.

Для определения тепловых деформаций станка можно использовать те же приборы, что и для оценки геометрической точности. Однако специфика здесь заключается в том, что деформация изменяется во времени (см. рис. 63). Поэтому применяют самопишущие приборы, регистрирующие эти изменения. Кроме того, часто необходимо определить характер температурных полей и их изменение во времени. Датчиками в этом случае служат термопары, установленные в зоне источников тепла и на исследуемых корпусных деталях.

Испытание станков на жесткость и виброустойчивость. В Советском Союзе разработаны нормы жесткости для станков различных типов. Стандартами предусмотрены метод нагружения, величина максимальной нагрузки и допустимые деформации элементов станка. Нормы регламентируют суммарную деформацию (например, шпинделя и суппорта) в направлении, определяющем точность обработки.

мые промежутки времени (межремонтные периоды). Эти периодические ремонты составляют основной объем ремонтных работ по восстановлению работоспособности оборудования.

2. Период времени от начала работы станка до его капитального ремонта является ремонтным циклом, так как станок после капитального ремонта должен отвечать всем требованиям, предъявляемым к новому станку.

3. Структура ремонтного цикла (число периодических ремонтов в цикле, их вид и чередование) обуславливается системой ППР и одинакова для различных типов станков.

4. Длительность межремонтного периода является одной из основных характеристик ремонтного цикла оборудования и устанавливается в зависимости от типа станка и условий его работы.

5. Содержание и трудоемкость работ в плановом ремонте характеризуются числом слесарных и станочных нормочасов. Соотношение между объемами ремонтов данного наименования (малый, средний, капитальный) одинаково для всех станков.

6. Трудоемкость ремонта определяют с помощью групп ремонтной сложности станка R — условного коэффициента, показывающего, во сколько раз трудоемкость ремонта данного станка больше, чем трудоемкость ремонта станка-эталона.

7. Указанные в системе объемы ремонтных работ являются средними и допускают отклонения как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения в зависимости от фактического состояния станка.

8. Кроме периодических ремонтов предусмотрено межремонтное обслуживание станков, при котором кроме профилактических мероприятий (смазки, очистки, промывки станков) производят малотрудоемкий ремонт (замена быстроизнашиваемых деталей, регулирование механизмов, зачистка забоин, устранение мелких повреждений и т. д.) и ремонт некоторых быстро изнашивающихся деталей.

9. Системой ППР планируется также осмотры и проверки станка на точность для выявления состояния оборудования и уточнения объема ремонтных работ. В ряде случаев отдельно планируются промывки станков.

Система учитывает разнообразие оборудования и условий работы, которые имеются в производстве. Она предусматривает установление различных межремонтных периодов, допускает отклонение трудоемкости ремонта от средних значений и, наконец, осуществляет целый комплекс профилактических мероприятий, не допускающих неожиданного выхода оборудования из строя и возникновения прогрессивных износов. Для ремонтного цикла применяются шестипериодная (I—I—II—I—I—III) и девятипериодная (I—I—II—I—I—II—I—I—III) структуры, где I — малый, II — средний, III — капитальный ремонт. Длительность межремонтного периода в зависимости от типа и условий работы колеблется в пределах 2600—5850 часов, отработанных станком.

При малом I ремонте производят замену или восстановление небольшого числа изношенных деталей, регулирование механизмов, проверку состояния станка и правильности функционирования системы смазки. При среднем II ремонте производят больший объем ремонтных работ, который включает частичную выверку координат станка и восстановление утраченной точности. Средний ремонт производят без снятия станка с фундамента. При капитальном III ремонте производят полное восстановление утраченной работоспособности станка.

Система ремонта включает также комплекс мероприятий, регламентирующих рациональные методы эксплуатации станка. Межремонтное обслуживание предусматривает наблюдение за состоянием оборудования, за правильностью его эксплуатации, выполнение необходимого регулирования, устранение мелких дефектов, смазку оборудования. Периодические ремонты включают такие операции, как промывка оборудования, смена масла и продувка смазочной системы, проверка оборудования на точность и жесткость, что также создает условия для нормальной эксплуатации оборудования. Для поддержания высокой работоспособности станка и обеспечения требований долговечности трущихся пар большое значение имеет система смазки. Наиболее совершенны централизованные системы смазки, когда специальная гидросистема, состоящая из насоса,

фильтров, дозаторов, реле давления и других элементов, надежно обеспечива-ет смазку всех основных элементов станка. Однако, поскольку в станке имеется большое число пар трения (зубчатые колеса, подшипники, шарни-ры механизмов), работающие в раз-личных силовых и кинематических условиях, выбор сорта смазки отражает средние условия работы механизмов станка. Применение разных смазок усложнило бы конструкцию и методы эксплуатации станка. Исключение для применения автономных систем смазки может составлять смазка шпиндельных опор, поскольку их работоспособность во многом определяет технические ха-рактеристики всего станка. Специаль-ные системы смазки могут также при-меняться для направляющих сколь-жения.

Следует также иметь в виду, что одним из основных условий рациональ-

ной эксплуатации станков является соблюдение условий безопасности при работе. Современные станки являются мощными, быстроходными машинами, снимающими нередко большое количе-ство стружки в единицу времени. Возможность травм при попадании рабочего в зону действия механизмов, при поломках быстровращающихся частей станка (шкивов, шлифовальных кругов), при поражении отлетающей горячей и острой стружкой, при попа-дании под напряжение и других причи-нах обязывает применять специальные устройства и механизмы, обеспечиваю-щие безопасную работу на станке.

Высокая эффективность станка, зало-женная при его проектировании и изго-товлении, будет реализована лишь в том случае, если применяют рациональ-ные методы его эксплуатации и ремонта.

Глава **14** Динамическая система станка и ее показатели

§ 1. Понятие о замкнутой динамической системе станков

Работа станков сопровождается деформацией упругой системы и процессами, развивающимися в подвижных соединениях: процесс резания (ПР), процесс трения (ПТ) и процессы в двигателях (ПД). Для каждого из этих явлений существует определенная зависимость между действующими силами и перемещениями в широком смысле этого понятия.

Упругая система (УС) включает станок, приспособление, инструмент, деталь (СПИД). Общее представление о ее деформации y в зависимости от нагрузки Q известно из исследования жесткости станков j :

$$Q = jy, \quad (69)$$

Силы резания зависят от различных параметров обработки: геометрии инструмента, режимов резания, трения, деформации в зоне контакта. Широко используют линейную зависимость сил резания P от площади сечения среза:

$$P = Kba, \quad (70)$$

где K — удельная сила резания (для стали $K \approx 2000 \text{ Н/мм}^2$); b , a — ширина и толщина среза. Величина a зависит от относительных смещений инструмента и заготовки.

Процесс трения характеризуется зависимостью силы трения F от нормальной нагрузки N и коэффициента трения μ . Нагрузку можно выразить через коэффициент нормальной жесткости j_n и нормальную деформацию y_n :

$$N = j_n y_n^m.$$

В соответствии с законом Амонтона-Кулона:

$$F = \mu j_n y_n^m, \quad (71)$$

где m — показатель степени.

На рис. 96,а жирными линиями выделены места, где протекают основные процессы, стрелками показано направление сил резания $P(t)$ и трения $F(t)$, под действием которых деформируется УС. Можно предположить, что при известных $P(t)$ и $F(t)$ колебания шпинделя и суппорта можно рассматривать автономно как вынужденные колебания. Однако в общем случае металлорежущий станок нельзя рассматривать так упрощенно, независимо от деформации деталей и сопровождающих его работу процессов резания, трения и др. Известно, что в результате деформации УС изменяется относительное положение суппорта и шпинделя, салазок и станины, ротора и статора и т. д. Смещения в упругой системе, в свою очередь, вызывают изменение параметров процессов, происходящих в подвижных соединениях (сил резания и трения). Например, изменение силы резания $P(t)$ приводит к изменению относительного смещения инструмента и заготовки на величину y (рис. 96,б). Пропорционально y изменяются толщина a (на величину Δa) и площадь сечения среза f (на величину Δf). Сила резания получает новое значение $P_1(t)$. Изменение силы резания приводит к новому смещению в упругой системе станка, и т. д.

Такую связь между параметрами системы называют обратной. Причем важно, что установленная обратная связь существует между УС и ПР. Аналогичную связь можно проследить между

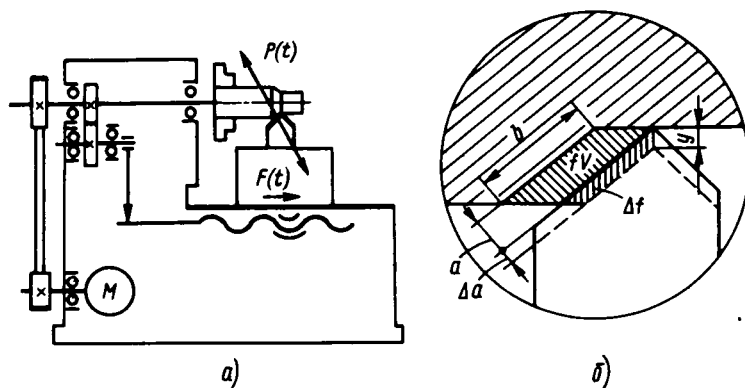


Рис. 96. Схема силовых воздействий процессов на деформацию УС:

а — схема станка; б — изменение сечения среза Δf при деформации УС

УС и ПТ, наблюдая изменение сил трения с изменением деформаций в упругой системе.

Формализованное выделение в динамической системе (ДС) станка УС и процессов, которые в дальнейшем будем называть основными элементами системы, и обратная связь между ними позволяют для исследования системы использовать известные зависимости и методы анализа теории автоматического регулирования [26, 41]. Взаимодействие между элементами системы иллюстрирует рис. 97. Связь между элементами, т. е. воздействие процессов на УС и обратное воздействие УС на процессы, показана стрелками. Непосредственной связи между процессами не существует. Процессы могут взаимодействовать между собой только через УС.

Совокупность элементов и связи между ними образует контур связи. Согласно теории проф. В. А. Кудинова [26], динамическая система станка является многоконтурной замкнутой системой. На рис. 97,а показано три контура связи: УС — ПР, УС — ПТ, УС — ПД.

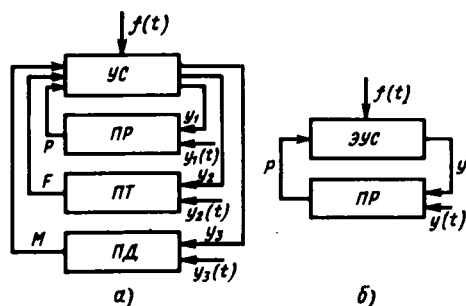


Рис. 97. Схема динамической системы станка [26]:

а — многоконтурная; б — одноконтурная

Если разорвать связь между элементами, то такая система называется разомкнутой.

Упругая система испытывает со стороны процессов главным образом силовое воздействие в виде сил резания P , трения F и момента M . В свою очередь, УС воздействует на процессы своей деформацией: y_1, y_2, y_3 . Анализ рассмотренных воздействий показывает общее свойство связей для всех контуров: воздействие всех процессов на УС является функцией координат УС, т. е. ее деформации. Такие воздействия называются внутренними.

Внешние воздействия на ДС станка условно делят на две группы: 1) воздействие $f(t)$ на упругую систему, зависящее от геометрической и кинематической точности станка, его деталей и сопряжений; 2) воздействие на процессы в подвижных соединениях — изменение настройки $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ (рис. 97). Для процесса резания к этим воздействиям относятся изменение сечения срезаемого слоя при фрезеровании, обработка по следу и др. Термин «внешнее воздействие» применяется здесь в том смысле, что воздействие не зависит от координат данной системы. Например, когда деформация УС, вызванная «внешним воздействием», не изменяет это воздействие.

В зависимости от объекта исследования многоконтурную ДС станка (рис. 97,а) можно представить в виде одноконтурной (рис. 97,б), включающей эквивалентный элемент и исследуемый процесс. Например, если исследуется процесс резания, то элемент ПР сохраняется, а все остальные включаются в эквивалентную упругую систе-

му ЭУС (рис. 97,б). При оценке ЭУС должно учитываться влияние процессов в подвижных соединениях.

§ 2. Статические характеристики основных элементов ДС станков

Свойства ДС станка и ее элементов определяются их характеристикой [26]. Разорвем две связи элемента $ПР$ (см. рис. 97,а) и рассмотрим его отдельно (рис. 98,а). Воздействие на входе элемента назовем входной координатой $x_{вх}$, а результат воздействия — выходной координатой $x_{вых}$. Уравнение, связывающее выходную и входную координаты, называется характеристикой W элемента или системы. Характеристика элемента $ПР$ (Н/мм)

$$W_{ПР} = \frac{x_{вых}}{x_{вх}} = \frac{P}{y_1(t)}. \quad (72)$$

Характеристика разомкнутой системы (рис. 98,б):

$$W_{раз} = \frac{x_{вых}}{x_{вх}} = \frac{y}{y_1(t)}. \quad (73)$$

Ее можно определить через характеристики составляющих элементов. При последовательном соединении элементов (рис. 98,б) характеристика разомкнутой системы равна произведению характеристик составляющих элементов:

$$W_{раз} = W_{УС} W_{ПР}. \quad (74)$$

При параллельном соединении элементов (рис. 98,в), например для УС, включающей шпиндель и суппорт с характеристиками соответственно $W_{шп}$ и W_c ,

$$W_{раз} = W_{шп} + W_c. \quad (75)$$

Характеристика называется статической, если входная координата не изменяется во времени, и динамической, если изменяется.

Статическая характеристика УС. Если воздействовать на УС постоянной силой P , то результатом воздействия будет упругое смещение y . Следовательно, статическую характеристику $W_{УС}$ (мм/Н) можно представить отношением

$$W_{УС} = K_{УС} = \frac{y}{P}. \quad (76)$$

Эту характеристику называют податливостью или обратной жесткостью (здесь и в дальнейшем через K будем обозначать только статические характеристики).

Регламентированные стандартом нормы точности станков предусматривают измерение относительных упругих смещений $y_{отн}$ несущих элементов станка по нормали к обработанной поверхности ($y = y_{отн}$) под действием сил, эквивалентных вектору сил резания ($P \rightarrow \bar{P}$).

Статическая характеристика УС станка или любого его звена графически имеет вид петли гистерезиса (рис. 99), площадь которой характеризует работу сил внутреннего и внешнего трения (см. гл. 8, § 2, рис. 61). В уравнение динамики характеристику УС удобно вводить в виде постоянного коэффициента, для чего ее необходимо линеаризовать, т. е. представить в виде линейной характеристики. Наиболее просто это достигается выделением чисто упругих свойств характеристики.

Аналитическое исследование упругих систем с трением, состоящих из n линейных упругих звеньев, показало, что упругая составляющая характеристики может быть представлена в виде прямой I (рис. 99,а), проходящей через начало координат и параллельной прямолинейному участку нагрузочной ветви 2, если силы трения принять постоянными. При изменении сил трения пропорционально нагрузке линейная характеристика проходит через начало ко-

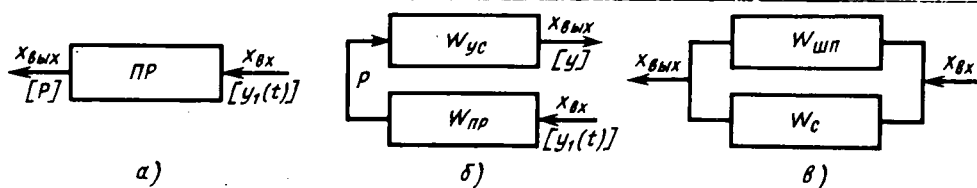


Рис. 98. Схема разомкнутых динамических систем:

а — элемент процесса резания; б — последовательное соединение элементов; в — параллельное соединение элементов

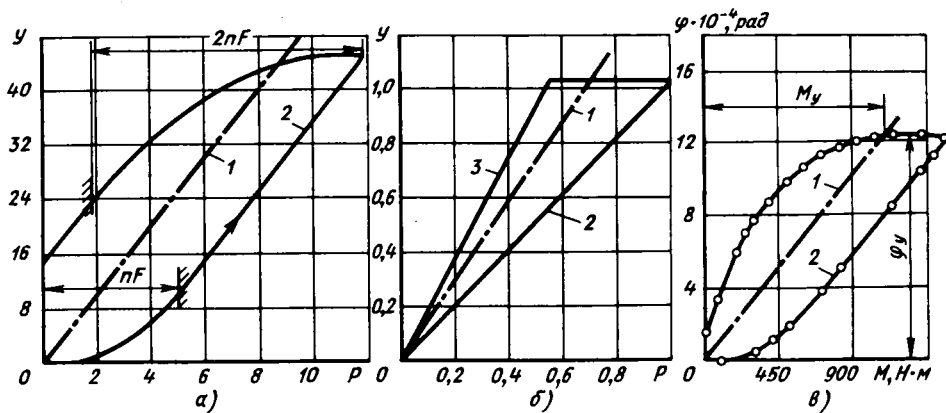


Рис. 99. Статические характеристики упругих систем:

a — силы трения, не зависящие от внешней нагрузки (nF — суммарная сила трения); *b* — силы трения, пропорциональные внешней нагрузке; *в* — экспериментальные характеристики жесткости резцовой головки (M_y , φ_y — момент внешних сил и упругая деформация)

ординат (рис. 99,б) и асимметрична относительно участков 2, 3.

В соответствии с изложенным принципом по экспериментальному графику для резцовой головки построена линейная, чисто упругая характеристика 1 (рис. 99,в). Статическая характеристика $K_{yc} = \frac{\varphi_y}{M_y}$; где φ_y , M_y — угловой и силовой параметры характеристики жесткости.

Статическая характеристика станка определяется величиной контактных и собственных деформаций. Из-за сложности расчета чаще всего ее определяют экспериментально и значительно реже — аналитически.

В соответствии с видами деформации все случаи расчета собственной жесткости деталей можно свести к растяжению-сжатию (j_p), изгибу (j_n) и кручению ($j_{кр}$):

$$j_p = \frac{ES}{l}; j_n = \frac{EJ}{l^3} C_1;$$

$$j_{кр} = \frac{M}{\varphi} = \frac{GJ_p}{l} C_2.$$

Анализируя эти формулы, легко заметить, что жесткость не зависит от прочности и термической обработки материала, а только от модуля упругости E , G , площади S или момента инерции J , J_p и длины стержня l . Коэффициенты C_1 и C_2 зависят от способов закрепления стержня (балки).

В некоторых случаях доминирующей УС станка является шпиндель, который можно представить в виде балки на упругих опорах (табл. 9). При постоянном показателе жесткости EJ характеристика такой системы определяется уравнением с двумя постоянными коэффициентами A_0 , A_1 , независимо от числа и вида нагрузок:

$$EJy = A_0 + A_1x + \Phi(x), \quad (77)$$

где x — текущая длина вала; $\Phi(x)$ — частное решение полного дифференциального уравнения.

Частное решение $\Phi(x)$ для сосредоточенной силы (схемы 1—3) и распределенной нагрузки $q = \frac{G}{l}$ (схема 4), где G — вес вала, l — длина вала:

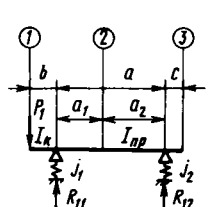
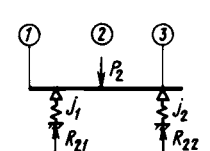
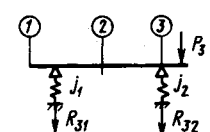
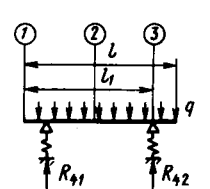
$$\Phi(x) = -\frac{P_i}{6}(x-l_i)^3; \Phi(x) = -\frac{q}{24}x^4,$$

где P_i — сосредоточенная нагрузка; l_i — соответствующая ей координата.

Коэффициенты A_0 , A_1 находят после подстановки в уравнение (77) двух формул граничных условий над опорами: 1) при $x = b$, $y = -y_1$; 2) при $x = a + b$, $y = y_2$.

В табл. 9 приведены расчетные схемы и формулы для определения прогиба y_{ik} от единичной силы (i — номер схемы, k — сечение вала, в котором определяется прогиб). По принципу независимости действия сил общий прогиб в данном сечении y_k равен ал-

Расчетные схемы и формулы для определения прогиба различных участков шпинделя

№ по- пор	Расчетная схема	Прогиб y_{ik} от единичной силы	Прогиб опор
1		$y_{11} = \left \frac{(a+b)^2}{j_1 a^2} + \frac{b^2}{j_2 a^2} + \frac{b^3}{3EJ_k} + \frac{ab^2}{3EJ_{np}} \right $ $y_{12} = \left \frac{(a+b)a_2}{j_1 a^2} - \frac{a_1 b}{j_2 a^2} - \frac{a_2 b(a^2 - a_2^2)}{6EJa} \right $ $y_{13} = \left \frac{(a+b)c}{j_1 a^2} + \frac{(a+c)b}{j_2 a^2} - \frac{abc}{6EJ} \right $	$y_1 = P_1 \frac{a+b}{j_1 a}$ $y_2 = P_1 \frac{b}{j_2 a}$
2		$y_{21} = y_{12}$ $y_{22} = - \left \frac{a_2^2}{j_1 a^2} + \frac{a_1^2}{j_2 a^2} + \frac{a_1^2 a_2^2}{3EJa} \right $ $y_{23} = \left \frac{a_2 c}{j_1 a^2} - \frac{a_1(a+c)}{j_2 a^2} + \frac{a_1 c(a^2 - a_1^2)}{6EJa} \right $	$y_1 = P_2 \frac{a_2}{j_1 a}$ $y_2 = P_2 \frac{a_1}{j_2 a}$
3		$y_{31} = y_{13}$ $y_{32} = y_{23}$ $y_{33} = - \left \frac{c^2}{j_1 a^2} + \frac{(a+c)^2}{j_2 a^2} + \frac{c^2(a+c)}{3EJ} \right $	$y_1 = P_3 \frac{c}{j_1 a}$ $y_2 = P_3 \frac{(a+c)}{j_2 a}$
4		$y_{41} = - \frac{ql}{2a^2} \left\{ \frac{l_1(l_1 - c)}{j_1} - \frac{b(l - 2b)}{j_2} - \frac{ab}{12EJ} \left \frac{l_1 b^3}{l} - \frac{l_1^4}{l} + 2a^2(l_1 - c) \right \right\}$ $y_{42} = - \frac{ql}{2a^2} \left\{ \frac{(l_1 - c)a_2}{j_1} + \frac{(l - 2b)a_1}{j_2} - \frac{a}{12EJ} \left \frac{a_2 b^4}{l} + \frac{a_1 l_1^4}{l} - \frac{a(a_1 + b)^4}{l} - 2a_1 a_2(l_1 - c)(a + a_1) \right \right\}$	$y_1 = \frac{ql(l - 2c)}{2j_1 a}$ $y_2 = \frac{ql(l - 2b)}{2j_2 a}$

гебраической сумме прогибов от каждой из сил: $y_k = y_{1k} + y_{2k} + y_{3k} + y_{4k}$.

В настоящее время возможен расчет характеристик УС и с учетом контактной жесткости различных сопряжений [11].

В расчетах обычно учитывают приведенную жесткость j_{np} (податливость e_{np}) УС. Для системы, звенья которой последовательно воспринимают нагрузку, j_{np} и e_{np} определяют из отно-

шений

$$\frac{1}{j_{np}} = \sum \frac{1}{j_i}, \quad e_{np} = \sum e_i, \quad (78)$$

где j_i , e_i — жесткость и податливость i -го элемента системы.

При параллельном восприятии нагрузок $j_{np} = \sum j_i$ или $\frac{1}{e_{np}} = \sum \frac{1}{e_i}$.

Статическая характеристика ГР. При анализе замкнутой динамической системы станка было установлено, что

процесс резания испытывает воздействие со стороны УС в виде относительных упругих смещений, которые приводят к изменению толщины среза a . В результате такого воздействия изменяется сила резания P . Учитывая зависимость (70), статическую характеристику ПР можно представить в виде отношения

$$W_{\text{ПР}} = \frac{P}{a} = Kb = K_p, \quad (79)$$

где K_p — жесткость резания.

Статическая характеристика ПТ. Для наиболее распространенных видов трения (граничного, смешанного и жидкостного) существует зависимость силы трения F от скорости и нормальной нагрузки N (нормальной деформации y_n). Поэтому УС оказывает воздействие на процесс трения через изменение величины и направления скорости движения или нормальной деформации (более сложные зависимости молекулярно-механической теории трения здесь не рассматриваем).

Простейшей статической характеристикой трения является коэффициент трения μ . При малых контактных деформациях нормальную нагрузку можно представить в виде линейной зависимости $N = j_n y_n$ и записать статическую характеристику трения:

$$K_T = \frac{F}{y_n} = \mu j_n. \quad (80)$$

Аналогично можно говорить о статической характеристике трения K_v по скорости v : $K_v = \frac{F}{v}$.

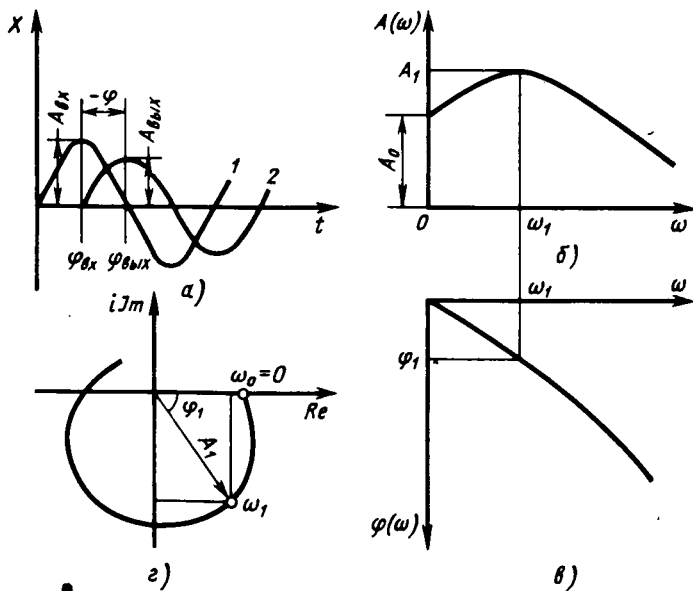
Следует отметить, что линейные характеристики УС, ПР и ПТ применяют для упрощения расчетов, практически они имеют более или менее выраженную нелинейность. Решение задач динамики с нелинейными характеристиками значительно сложнее.

§ 3. Частотные методы анализа ДС станков

Решение одной из главных задач динамики станков — виброустойчивости (устойчивости) — возможно с использованием динамических характеристик элементов системы. Они позволяют определить условия возникновения или отсутствия автоколебаний в зависимости от конструктивных и технологических параметров.

Предполагая ДС станка линейной, для ее анализа часто используют частотные динамические характеристики. Их физический смысл и способ получения удобно пояснить на примере временной характеристики (рис. 100, а), которая показывает изменение во времени t параметра X входной 1 и выходной 2 координат при постоянной частоте. Наличие таких характеристик для всего диапазона рабочих частот ω позво-

Рис. 100. Временная (а) и частотная (б — г) характеристики ДС



ляет построить частотные характеристики.

Различают АЧХ амплитудно-частотную характеристику $A(\omega) = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}}$ — отношение амплитуд выходной $A_{\text{вых}}$ и входной $A_{\text{вх}}$ координат (рис. 100, а, б), ФЧХ фазочастотную $\varphi(\omega) = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}$ — разность фаз выходной $\varphi_{\text{вых}}$ и входной $\varphi_{\text{вх}}$ координат в функции частоты (рис. 100, а, в) и АФЧХ амплитудно-фазовую частотную, которая совмещает две первых (рис. 100, г). Значения $A_{\text{вх}}$, $A_{\text{вых}}$ и $\varphi_{\text{вх}}$, $\varphi_{\text{вых}}$ берутся по рис. 100, а.

В дальнейшем мы будем использовать АФЧХ как некоторую обобщенную характеристику для оценки устойчивости станков, обозначая ее через $W(i\omega)$. Символы в скобках — мнимая единица i и круговая частота ω — свидетельствует о том, что характеристика частотная динамическая. Для нее сохраняют силу основные положения § 2, в том числе уравнения (72) — (76), (79), (80).

АФЧХ является комплексной величиной и строится на комплексной плоскости с действительной Re и мнимой $i \text{Im}$ осями:

$$W(i\omega) = \text{Re} + i \text{Im}. \quad (81)$$

Каждому значению частоты ω_1 соответствует свой модуль (амплитуда) A_1 и аргумент (разность фаз) φ_1 :

$$A_1 = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}; \quad \text{tg } \varphi_1 = \frac{\text{Im}}{\text{Re}}; \quad (82)$$

через которые также можно выразить динамическую характеристику (рис. 100, г)

$$W(i\omega) = A_1 (\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1), \quad (83)$$

Смещение по фазе φ (разность фаз) принимают отрицательным и откладывают по часовой стрелке, если выходная координата отстает от входной, что наиболее характерно для металлорежущих станков.

Рассмотрим для примера частотные характеристики простейшей ЭУС с одной степенью свободы, на которую воздействует периодическая возмущающая сила $P \sin \omega t$ (входная координата). Предположим, что упругие смещения y (выходная координата) в станке определяются главным образом

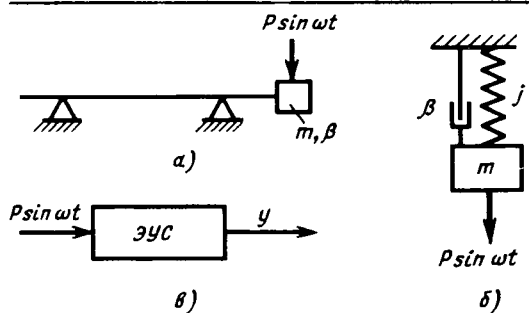


Рис. 101. Расчетные схемы ЭУС с одной степенью свободы

шпинделем. Тогда расчетную схему можно представить в виде невесомой упругой балки с приведенной массой m , жесткостью j и коэффициентом сил сопротивления β (рис. 101, схемы а, б, в — эквивалентны).

Для определения динамических характеристик составим дифференциальное уравнение УС:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \beta \frac{dy}{dt} + jy = P \sin \omega t. \quad (84)$$

Запишем его в операторной форме. Для этого символ дифференцирования заменим на некоторое комплексное число $p = \frac{d}{dt}$. Тогда решение дифференциального уравнения (84) сводится к решению алгебраического уравнения

$$\left(\frac{m}{j} p^2 + \frac{\beta}{j} p + 1 \right) y(p) = \frac{1}{j} P(p).$$

Обозначим: $T_1 = \sqrt{\frac{m}{j}}$ — инерционная постоянная времени, с; $T_2 = \frac{\beta}{j}$ — постоянная времени демпфирования, с.

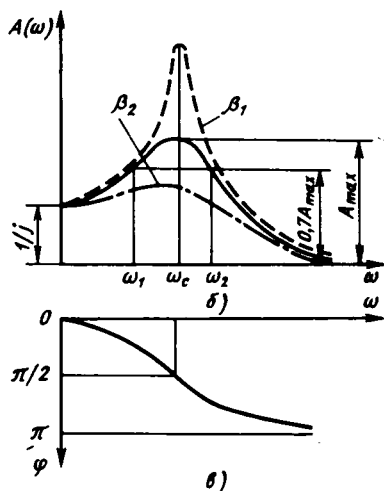
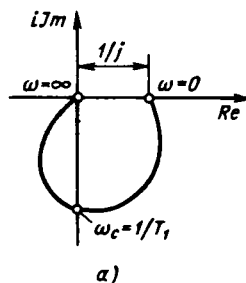
Так как $P(p)$ и $y(p)$ — соответственно входная и выходная координаты упругой системы, записанные в операторной форме, то ее передаточная функция

$$W_{\text{ЭУС}}(p) = \frac{y(p)}{P(p)} = \frac{\frac{1}{j}}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{K_{\text{ЭУС}}}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (85)$$

Переход от передаточной функции к динамической характеристике ЭУС, т. е. к АФЧХ, сводится к замене комплексного числа p на $i\omega$:

Рис. 102. Частотные характеристики ЭУС с одной степенью свободы:

a — АФЧХ; b — АЧХ; β_1, β_2 — коэффициенты сопротивлений; ω_1, ω_2 — частоты, соответствующие 0,7 максимальной амплитуды ($0,7 A_{max}$), необходимые для определения собственной частоты ω_c



$$W_{\text{ЭУС}}(i\omega) = \frac{y(i\omega)}{P(i\omega)} = \frac{K_{\text{ЭУС}}}{-T_1^2\omega^2 + T_2\omega + 1} \quad (86)$$

Здесь $K_{\text{ЭУС}}$ — статическая характеристика ЭУС, $W_{\text{ЭУС}}(i\omega)$ имеет смысл динамической податливости.

Выделим вещественную и мнимую части характеристики (86):

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{ЭУС}}(i\omega) &= \frac{\frac{1}{j} [(1 - T_1^2\omega^2) - T_2i\omega]}{(1 - T_1^2\omega^2)^2 - (T_2i\omega)^2}; \\ \text{Re} &= -\frac{\frac{1}{j} (1 - T_1^2\omega^2)}{(1 - T_1^2\omega^2)^2 + T_2^2\omega^2}; \\ \text{Im} &= -\frac{\frac{1}{j} T_2\omega}{(1 - T_1^2\omega^2)^2 + T_2^2\omega^2}. \end{aligned} \right\} \quad (87)$$

Для построения АФЧХ задаемся различными частотами ω и находим модуль и аргумент по формулам (82), (87), нанося точки на комплексной плоскости (рис. 102,а):

$$\text{при } \omega = 0 \quad \text{Re} = \frac{1}{j}, \quad \text{Im} = 0, \quad \text{tg } \varphi = 0, \quad \varphi = 0;$$

$$\text{при } \omega = \frac{1}{T_1} \quad \text{Re} = 0, \quad \text{Im} = -\frac{T_1}{jT_2},$$

$$\text{tg } \varphi = \infty, \quad \varphi = \frac{\pi}{2};$$

$$\text{при } \omega = \infty \quad \text{Re} = 0, \quad \text{Im} = 0,$$

$$\text{tg } \varphi = 0, \quad \varphi = \pi.$$

При частоте, равной нулю, динамическая характеристика равна статической:

$$W_{\text{ЭУС}}(i\omega) = \frac{1}{j} = K_{\text{ЭУС}}. \quad (88)$$

Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики отражают частные стороны одного и того же процесса. Для рассмотренной системы закономерность изменения этих характеристик получим из формул (82) и (87), задаваясь теми же значениями частот ω , которые приняты для построения АФЧХ (рис. 102,б,в).

Амплитудно-частотная характеристика при $\omega = \frac{1}{T_1}$ соответствует резонансу (рис. 102,б), и возмущающая частота равна собственной частоте ω_c системы: $\omega = \frac{1}{T_1} = \omega_c$; $A(\omega) = \frac{T}{jT_2}$; $T_2 = \frac{\beta}{j}$ при $\beta = 0$, $A(\omega) \rightarrow \infty$.

Следовательно, без учета сил сопротивления амплитуда стремится к бесконечности, что соответствует резонансу.

§ 4. Основные показатели динамического качества станков

Как для статических, так и динамических систем станков существуют единые методы исследования независимо от рассматриваемой конструкции. Это позволяет вводить общие показатели, которые характеризуют качество стати-

ческой или динамической системы. Для статических систем станков широко используют такие показатели, как прочность, кинематическая и геометрическая точность, жесткость и др. (см. раздел 2); для динамических систем — запас и степень устойчивости, отклонения параметров системы при внешних воздействиях, быстродействие.

Показатели качества системы используют для сравнительной оценки существующих и проектируемых конструкций с точки зрения повышения производительности и качества обработки.

Устойчивость станка — его главное динамическое качество. Под устойчивостью будем понимать способность ДС станка сопротивляться возникновению автоколебаний (см. гл. 8, § 3). Устойчивая система всегда возвращается к состоянию равновесия, если она получила какое-либо случайное отклонение в результате возмущающего воздействия.

Один и тот же станок в зависимости от условий обработки — режимов резания, геометрии инструмента, регулирования станка и др. — может быть устойчивым или неустойчивым. В связи с этим говорят о потере устойчивости станком или о зонах устойчивых и неустойчивых параметров процесса. Зависимость предельной скорости резания v при растачивании от вылета борштанги l показана на рис. 103. Область выше кривой характеризует параметры неустойчивого процесса обработки, а

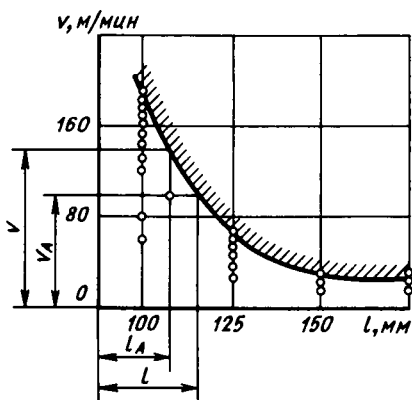


Рис. 103. Экспериментальная зависимость предельной скорости резания V от вылета борштанги l

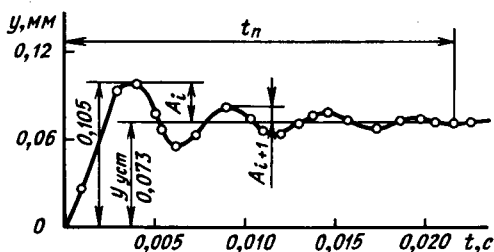


Рис. 104. Переходной процесс при врезании инструмента

ниже кривой — устойчивого. Кривая называется границей устойчивости.

Удаленность различных точек зоны устойчивости от границы устойчивости характеризуется запасом устойчивости $K_{з.у.}$. Для точки A (рис. 103) можно говорить о запасе устойчивости по скорости резания $K_{з.у.} = \frac{v}{v_A}$ и вылету борштанги $K_{з.у.} = \frac{l}{l_A}$. Запас устойчивости

$K_{з.у.}$ показывает, во сколько раз можно увеличить данный параметр, не выходя за пределы границы устойчивости системы.

График переходного процесса при врезании инструмента показан на рис. 104. За время затухания колебаний изменяется относительное положение инструмента и заготовки, следовательно, изменяется и качество обработки.

Для оценки скорости затухания переходных процессов вводится показатель степени устойчивости. Он характеризует способность систем рассеивать энергию внешних возмущений и оценивается логарифмическим декрементом колебаний

$$\lambda = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}},$$

где A_i, A_{i+1} — затухающие амплитуды колебаний. Чем больше λ , тем быстрее уменьшаются отклонения, т. е. смещения A_i системы от установившегося значения $y_{уст.}$.

Быстродействие системы определяется временем затухания переходных процессов t_n (см. рис. 104). В современных станках ЧПУ быстродействие привода в значительной степени определяет производительность и точность обработки. Показатели динамического качества — быстродействие и степень устойчивости взаимосвязаны.

Общие показатели динамического качества станков обычно оцениваются

параметрами, характеризующими какое-либо качество станков: точность, производительность, долговечность и т. д. Если нас интересует производительность, то в качестве параметра для оценки показателей динамического качества принимается предельная скорость резания (см. рис. 103), предельная ширина резания (см. гл. 16, 17) и т. п. Если исследуется точность станка, то показатели динамического качества оцениваются через относительное смещение инструмента и заготовки по нормали к обработанной поверхности и т. д.

Критерии устойчивости. Для оценки устойчивости ДС, в том числе станков, получили применение различные критерии, которые позволяют определять устойчивость системы по некоторым признакам, без решения уравнений. При исследовании динамики станков чаще всего используются критерии Найквиста и Рауса-Гурвица [41].

Частотный критерий Найквиста позволяет оценивать устойчивость замкнутой системы по характеристике разомкнутой системы (74) и использовать экспериментальные АФЧХ, что особенно важно при исследовании таких сложных ДС, как металлорежущие станки.

В соответствии с критерием Найквиста замкнутая система будет устойчивой, если АФЧХ (кривая 1, рис. 105) разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $[-1, i0]$. В противном случае система неустойчива — кривая 2.

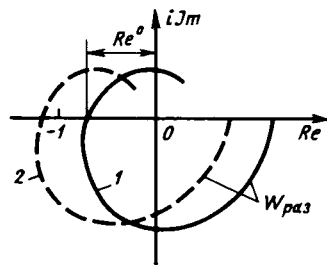


Рис. 105. Оценка устойчивости ДС станка по характеристике разомкнутой системы $W_{раз}$.

Условие устойчивости ДС можно записать через отрезок Re^0 , отсекаемый характеристикой на отрицательной вещественной оси,

$$Re^0 < |1|. \quad (89)$$

Если характеристика проходит через точку с координатами $[-1, i0]$, то система находится на границе устойчивости: $Re^0 = |1|$. Запас устойчивости по амплитуде определяется как $(1 - Re^0) 100\%$.

Алгебраический критерий устойчивости Рауса-Гурвица удобно применять, если ДС описывается уравнением до четвертого порядка включительно. В частности, для систем, описываемых характеристическим уравнением первого и второго порядка: $a_0 c + a_1 = 0$; $a_0 c^2 + a_1 c + a_2 = 0$ — достаточным признаком устойчивости является положительное значение всех коэффициентов, т. е. $a_0 > 0$, $a_1 > 0$ и $a_2 > 0$.

Глава 15

Расчет вынужденных колебаний систем станка

§ 1. Вынужденные колебания в станках. Общие сведения

По степени распространенности и роли в станках вынужденные колебания можно поставить на второе место после автоколебаний. Широкий спектр частот возмущающих воздействий и большое число несущих звеньев станка с различными собственными частотами по всем координатным осям создают благоприятные усло-

вия для возникновения резонанса. Изучение вынужденных колебаний разомкнутой ДС является также необходимым этапом в исследовании виброустойчивости станка. Для повышения динамического качества станков нормируют амплитуду колебаний холостого хода, которые являются результатом различных возмущений со стороны подшипников качения и привода. У координатно-расточных станков размах колебаний гильзы (двойная амплитуда $2A$),

Допустимый размах колебаний гильзы (2А)
относительно стола на холостом ходу
координатно-расточных станков

$d_{ш}, \text{мм}$	2А, мкм		
	Класс точности станков.		
	В	А	С
До 32	1,2	0,8	0,5
32—50	1,6	1,0	0,6
50—80	2,0	1,2	0,8

относительно стола на холостом ходу регламентируется в зависимости от точности и диаметра шейки шпинделя в передней опоре $d_{ш}$ (табл. 10).

Общие свойства вынужденных колебаний рассмотрим на примере простейшей системы (см. рис. 101,а):

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + \beta\dot{y} + jy &= P \sin \omega t \text{ или} \\ \ddot{y} + 2b\dot{y} + p^2y &= \frac{P}{m} \sin \omega t, \end{aligned} \quad (90)$$

где $2b = \frac{\beta}{m}$, $p^2 = \frac{j}{m}$.

Уравнение (90) имеет постоянные коэффициенты β (или b), j , p и описывает наиболее общий случай вынужденных колебаний одномассовой системы, к которым можно свести многие задачи динамики станков. Оно отражает равновесие системы с учетом всех действующих сил: $m\ddot{y}$ — инерционные силы, $\beta\dot{y}$ — силы неупругого сопротивления, принятые пропорциональными скорости движения $\dot{y}$; jy — силы упругого сопротивления.

Внешняя сила $P \sin \omega t$ (возмущающее воздействие) и сила неупругого сопротивления здесь написаны в общепринятой, наиболее удобной для решения форме. Но они могут быть представлены и другими законами [39]. Постоянные коэффициенты b , j , m являются основными параметрами ДС. Решение задач динамики станков начинается с их определения.

1. Собственная частота колебаний f и коэффициент сопротивления b определяют по осциллограммам затухающих колебаний (рис. 106) по формулам (92) и (96). Если возможно — аналитически.

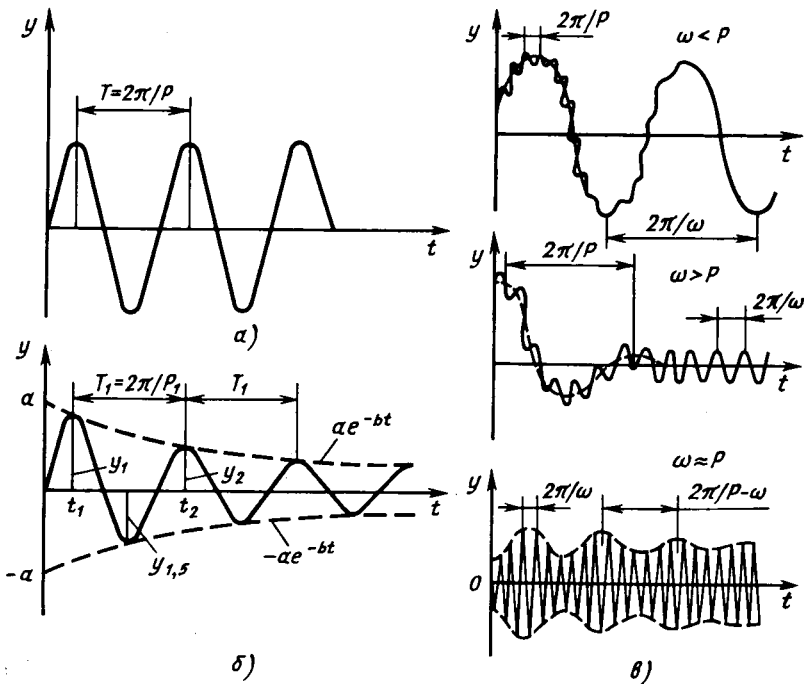


Рис. 106. Виды колебаний:

а — собственные незатухающие колебания; б — затухающие колебания; в — характер переходных процессов в зависимости от соотношения собственных p и вынужденных ω частот колебаний: $\omega < p$, $\omega > p$, $\omega \approx p$

2. Жесткость j находится по характеристикам жесткости.

3. По величинам жесткости и собственной частоты находят приведенную массу ДС: $m = \frac{j}{(2\pi f)^2}$.

4. Определяют амплитуду и частоту возмущающего воздействия.

5. Для нелинейных ДС станков устанавливают характеристики сил резания, трения и жесткости.

Методический подход к исследованию нелинейных ДС тот же, что и линейных. Но вместо постоянных коэффициентов в уравнениях динамики подставляют значения соответствующих нелинейных характеристик. Уравнения динамики становятся нелинейными. Их решение не имеет стандартной формы, что и вызывает главные трудности исследования.

Чтобы выяснить влияние возмущающих воздействий и сил сопротивления на динамические свойства системы, рассмотрим несколько частных случаев.

1. При $\beta = 0$ и $P \sin \omega t = 0$ решение уравнения (90) имеет вид

$$y = C_1 \sin pt + C_2 \cos pt.$$

Если вместо постоянных интегрирования C_1 и C_2 ввести новые постоянные a (амплитуда) и α (начальная фаза), то

$$y = a \sin(pt + \alpha). \quad (91)$$

Колебания имеют гармонический характер (рис. 106,а), а постоянные зависят от начальных условий y_0 и $\dot{y}_0$. Круговая частота p , а следовательно, и период T собственных колебаний не зависят от начальных условий и поэтому являются постоянной характеристикой данной системы:

$$T = \frac{2\pi}{p}, \quad f = \frac{1}{T} = \frac{p}{2\pi}. \quad (92)$$

2. С учетом сил сопротивления $\beta \neq 0$ и $P \sin \omega t = 0$ решение уравнения (90) отличается наличием множителя e^{-bt} (при $p^2 > b^2$):

$$y = e^{-bt} (C_1 \sin p_1 t + C_2 \cos p_1 t) \text{ или} \\ y = e^{-bt} a \sin(p_1 t + \alpha), \quad (93)$$

где $p_1 = \sqrt{p^2 - b^2}$.

Периодический характер колебаний сохраняется. Но из-за сил сопро-

тивления они с течением времени затухают (рис. 106,б), так как множитель e^{-bt} уменьшается. По модулю величина $\sin(p_1 t + \alpha)$ не может быть больше единицы. Поэтому амплитуда затухания колебаний заключается между двумя кривыми:

$$y = ae^{-bt} \text{ и } y = -ae^{-bt}. \quad (94)$$

Следовательно, в реальной конструкции собственные колебания затухают при любом малом коэффициенте сопротивления b , и при установившемся процессе не учитываются.

Собственная частота p_1 и период колебаний T_1 практически не зависят от сил вязкого сопротивления

$$T_1 = \frac{2\pi}{p_1} = \frac{2\pi}{\sqrt{p^2 - b^2}} = T \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{b^2}{p^2}}}, \quad (95)$$

так как отношение b^2/p^2 мало.

Интенсивность затухания собственных колебаний определяется логарифмическим декрементом затухания λ (рис. 106,б):

$$\lambda = \ln \frac{y_1}{y_2} = \ln \frac{ae^{-bt_1}}{ae^{-b(t_1 + T_1)}} = bT_1. \quad (96)$$

По зависимости (95), (96) можно оценить правомочность принятого допущения, что $p^2 > b^2$. Пусть за один период амплитуда уменьшается вдвое. Тогда

$$\ln \frac{y_1}{y_2} = \ln 2 = 0,693; \quad b = \\ = \frac{0,693 \sqrt{p^2 - b^2}}{2\pi}; \quad b^2 \approx 0,012 p^2,$$

т. е. $p^2 \gg b^2$, и практически $p_1 = p$, $T_1 = T$.

На этом же примере наглядно прослеживается интенсивность затухания колебаний. Уже через десять периодов амплитуда колебаний y_{10} уменьшается в 500 раз.

$$\text{Пусть } \frac{y_1}{y_2} = 2, \text{ тогда } y_2 = \frac{y_1}{2};$$

$$\text{аналогично } y_{10} = \frac{y_1}{2^{10-1}} = y_1 0,002.$$

3. При $\beta \neq 0$ и $P \sin \omega t \neq 0$ решение уравнения (90) имеет вид

$$y = ae^{-bt} \sin(p_1 t + \alpha) + A \sin(\omega t - k)$$

и представляет интерес при переходных процессах. При установившемся процессе учитывают только вынужденные колебания:

$$y = A \sin(\omega t - k), \quad (97)$$

где A — амплитуда вынужденных колебаний; k — сдвиг фазы вынужденных колебаний относительно фазы возмущающей силы.

$$A = y_{\text{ст}} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + 4 \frac{b^2 \omega^2}{p^4}}} = y_{\text{ст}} \mu, \quad (98)$$

где $y_{\text{ст}} = \frac{P}{J}$ — статический прогиб; μ — динамический коэффициент.

Из уравнений (97), (98) следует, что вынужденные колебания являются незатухающими, а их амплитуда зависит от отношения частот ω/p и вязкого сопротивления b/p . Частота вынужденных колебаний равна частоте возмущающей силы ω и не зависит от параметров колеблющейся системы.

Время переходного процесса t_n можно определить, задаваясь пренебрежимо малой амплитудой собственных колебаний, например 0,1A. Из формулы (93) амплитуда колебаний $ae^{-\alpha t}$ будет равна 0,1 A. Тогда

$$t_n = \frac{1}{b} \ln 10 \frac{a}{A}.$$

Характер переходного процесса зависит от соотношения частот (рис. 106, а).

Амплитудное значение вынужденных колебаний, рассчитанное по формуле (98), при малых возмущающих частотах $\omega \ll p$ равно статическому прогибу: $A = y_{\text{ст}}$ и $\mu = 1$, независимо от сил сопротивления. При $\omega \gg p$ можно принять $A = y_{\text{ст}} \frac{p^2}{\omega^2}$, т. е. повышением частоты ω амплитуду колебаний можно сделать сколь угодно малой. Примерно при $\omega \approx p$ наблюдается резонанс колебаний, амплитуда быстро растет (рис. 107, а).

$$A_p = \frac{y_{\text{ст}}}{2b/p}; \quad \mu_p = \frac{p}{2b}. \quad (99)$$

Точное отношение резонансной частоты ω/p находят по экстремально-

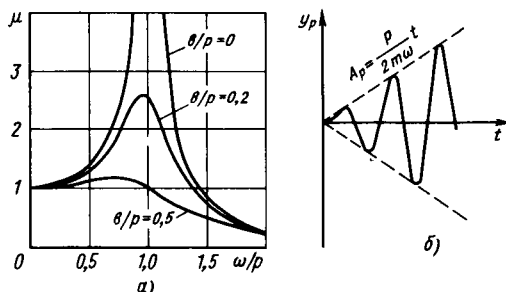


Рис. 107. Резонанс колебаний:

а — влияние возмущающей частоты ω и демпфирования b на амплитуду вынужденных колебаний; б — нарастание амплитуды во времени при резонансе

му значению подкоренного выражения (98). Обозначив $(\omega/p)^2 = x$, получим

$$f(x) = (1 - x)^2 + 4x \left(\frac{b}{p}\right)^2;$$

$$f'(x) = -2 + 2x + 4 \left(\frac{b}{p}\right)^2 = 0;$$

$$\left(\frac{\omega}{p}\right)_{\text{рез}} = \sqrt{1 - 2 \left(\frac{b}{p}\right)^2}.$$

Следует подчеркнуть, что при резонансе амплитуда растет не мгновенно, а пропорционально времени:

$$y_p = \frac{Pt}{2m\omega} \cos \omega t,$$

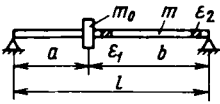
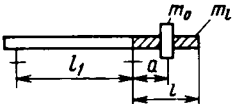
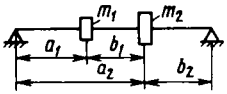
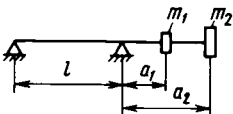
что позволяет переходить через резонанс, не опасаясь развития больших колебаний. Амплитуда A_p колебаний при резонансе растет по линейному закону (рис. 107, б).

При исследовании колебаний на расчетной схеме исходную конструкцию представляют невесомой балкой (см. рис. 101), за которой сохраняются упругие свойства реальной конструкции, а вся ее масса приведена к одному концу.

В станках приведение распределенных масс осуществляется из условия равенства, по крайней мере, собственной низшей частоты реальной системы и системы с приведенной массой. Практически можно говорить лишь о приближенных значениях приведенной массы.

Для примера рассмотрим распространенный класс деталей станков, которые можно представить в виде балок с равномерно распределенной мас-

Расчетные схемы и формулы для определения приведенных (расчетных) масс

Расчетная схема	Расчетная масса
	$m_p = m_0 + \frac{3l^4}{\pi^4 a^2 b^2} m$
	$m_p = m_0 + 0,3 \frac{l^2 (l + l_1)}{a^2 (a + l_1)} m_l$ где m_l — масса участка l
	$m_p = m_2 + m_1 \frac{a_1^2 b_1^2}{a_2^2 b_2^2}$
	$m_p = m_2 + m_1 \frac{a_1^2 (l + a_1)}{a_2^2 (l + a_2)}$

сой m (валы, оси и др.) (табл. 11). Расположенные на балке детали представим как сосредоточенные массы m_0 . Величины m и m_0 найдем по чертежу через объем V , V_0 и плотность материала ρ , ρ_0 : $m = \rho V$, $m_0 = \rho_0 V_0$. Если расчет колебаний производим относительно сосредоточенной массы m_0 (табл. 11, схема 1), то распределенная масса приводится к ней через коэффициент приведения $\epsilon = \frac{m_p}{m}$. Тогда расчетную массу m_p можно определить по формуле

$$m_p = m_0 + \epsilon m. \quad (100)$$

При исследовании необходимо четко представить физическую картину приведения масс. Из условия равенства кинетических энергий распределенной и приведенной масс (метод Релея) следует, что коэффициент ϵ тем больше, чем больше амплитуда колебаний приводимой массы по отношению к амплитуде точки приведения. Для элементарных участков (табл. 11, схема 3) $\epsilon_1 \approx 1$, а $\epsilon_2 \approx 0$ (среднее значение $\epsilon \approx 0,5$).

Формулы табл. 11 могут быть использованы для однопролетных и многопролетных (с небольшой погрешностью) балок. Конструктивная (а) и

расчетная (б) схемы шпинделя с патроном и зубчатым колесом, которые считаем сосредоточенными массами m_{02} и m_{01} , приведены на рис. 108. Расчетные массы m_{p2} и m_{p1} находим по известным распределенным массам консольной m_2 и пролетной m_1 частей шпинделя (с использованием формул табл. 11): $m_{p1} = m_{01} + \frac{3l^4}{\pi^4 a^2 b^2} m_1$; $m_{p2} = m_{02} + 0,3 m_2$.

При исследовании крутильных колебаний привода станков рассчитывают

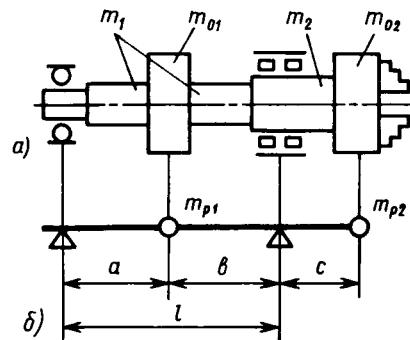


Рис. 108. Конструктивная и расчетная схемы шпинделя

приведенный момент инерции масс $J_{пр}$:

$$J_{пр} = J_d + \frac{1}{6} (J'_в + J''_в);$$

$$J_d = \frac{\pi \rho}{32} \sum_{i=1}^{i=n} l_i d_i^4, \quad (101)$$

где J_d — момент инерции детали привода, представляемой в виде многоступенчатого цилиндра; l_i, d_i — длина и диаметр каждой ступени; $J'_в, J''_в$ — моменты инерции участков вала справа и слева от детали (рассчитывают как J_d).

§ 2. Виброизоляция станков

Под виброизоляцией понимают изоляцию источников возмущений от соседних элементов. Если на станке неуравновешенность ротора электродвигателя или шпинделя с заготовкой создает периодическую возмущающую силу, то основание станка испытывает динамические нагрузки. Защита основания от действия этих нагрузок называется активной виброизоляцией. Защита станка или какой-либо системы от внешних возмущений (колебаний) называется пассивной виброизоляцией. Оба вида задач имеют одну принципиальную основу для своего решения.

Пассивная виброизоляция характерна для точных станков и измерительных устройств, где относительные колебания между заготовкой и инструментом не должны превосходить допустимых значений при заданных колебаниях основания.

Активная виброизоляция более важна для станков нормальной точности. Установка станков на виброопорах широко распространена из-за возможности быстрой перестройки технологического потока, стабильности виброизоляции, уменьшения шума и т. д.

Определим силу N , которую передает на фундамент станок (рис. 109, а), установленный на виброопорах с приведенной жесткостью j и вязким сопротивлением β (жесткость каждой опоры — j_1):

$$N = jy + \beta \dot{y}. \quad (102)$$

Смещение y при вынужденных колебаниях из уравнения (97) и с учетом уравнения (98)

$$y = \mu y_{ст} \sin(\omega t - k),$$

тогда

$$y = \mu y_{ст} \omega \cos(\omega t - k).$$

С учетом этих уравнений формула (102) примет вид

$$N = \mu y_{ст} [j \sin(\omega t - k) + \beta \omega \cos(\omega t - k)].$$

В последнее уравнение введем принятые ранее обозначения

$$\frac{j}{m} = p^2, \quad \frac{\beta}{m} = 2b \text{ и } y_{ст} = \frac{P}{j}:$$

$$\frac{N}{\mu P} = \sin(\omega t - k) + \frac{2b\omega}{p^2} \cos(\omega t - k). \quad (103)$$

Для определения максимальной передаваемой силы N продифференцируем

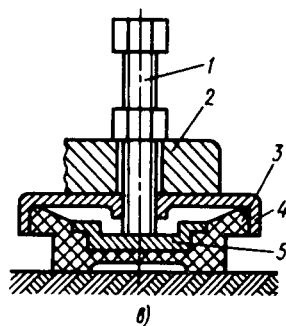
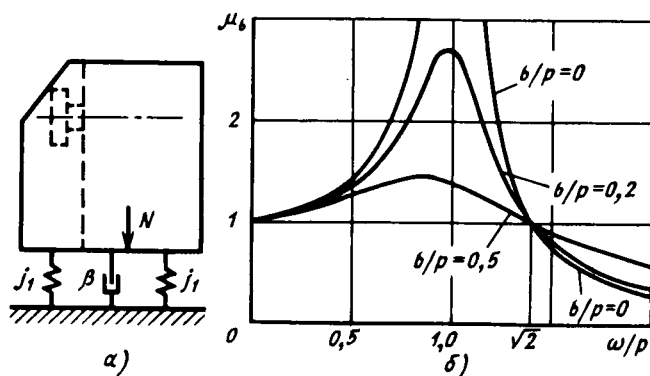


Рис. 109. Схема виброизоляции станков и передача динамических нагрузок на фундамент:

а — расчетная схема станка, установленного на виброопорах; б — изменение коэффициента передачи силы; в — виброизолирующая опора в рабочем состоянии; 1 — болт для регулирования высоты установки станка; 2 — опорная лапа станка; 3 — резиновый упругий элемент опоры; 4 — привулканизированная крышка; 5 — упорный фланец

уравнение (103) по t . Возведем в квадрат обе части полученного уравнения и уравнения (103) и сложим их почленно:

$$\left(\frac{N}{\mu P}\right)^2 = 1 + \frac{4b^2\omega^2}{p^4};$$

$$N = \mu P \sqrt{1 + \frac{4b^2\omega^2}{p^4}} = P\mu_b, \quad (104)$$

где μ_b — коэффициент передачи силы.

Как видно из (104), коэффициент μ_b характеризует величину передаваемой на основание силы, зависит так же как и динамический коэффициент μ , от отношения b/p и ω/p (рис. 109,б). Но влияние сил вязкого сопротивления изменяется: с ростом b/p при $\omega/p < \sqrt{2}$ нагрузка N снижается, а при $\frac{\omega}{p} > \sqrt{2}$ — увеличивается. Физический смысл этого явления заключается в том, что при высокой частоте возмущающей силы возрастают скорости и соответственно возрастает сила, действующая на основание по вязкой связи [второе слагаемое в уравнении (102)].

Для виброизоляции станки устанавливают на виброизолирующие опоры (рис. 109,в), состоящие из элементов с высоким рассеянием энергии, с относительно небольшой жесткостью [11]. Исследованиями установлено, что при этом виброустойчивость существенно снижается лишь в тех случаях, когда малы собственное демпфирование, собственная частота f_c динамической системы станка или мала масса станины по сравнению с массой несущего элемента станка.

Виброустойчивость установленных на опоры станков можно оценивать по критерию $f_c^3\lambda$, где f_c , λ — собственная частота в вертикальном направлении и логарифмический декремент затухания виброопоры. С ростом $f_c^3\lambda$ монотонно растет и предельная глубина резания, т. е. растет виброустойчивость.

Для токарной группы ответственных станков рекомендуют использовать виброопоры с частотой $f_c = \frac{40}{\sqrt{M}}$ при $\lambda = 0,6$ и $f_c = \frac{30}{\sqrt{M}}$ при $\lambda = 0,8$, где M — масса станка, т.

Демпфирование колебаний. Количественно рассеяние энергии оценивают логарифмическим декрементом λ или относительным рассеянием энергии:

$$\psi = \frac{\Delta A}{A}, \quad (105)$$

где ΔA — рассеяние энергии за один период колебаний, равной работе сил сопротивления; A — потенциальная энергия, соответствующая амплитуде цикла.

К определению ψ нет единого подхода. Если относительное рассеяние энергии определяют при установившихся вынужденных колебаниях, то амплитуда постоянна и A соответствует максимальной упругой энергии. При определении ψ по свободным затухающим колебаниям следует учитывать изменения амплитуды.

1. Количество энергии A определяют по амплитуде в начале цикла y_1 (рис. 106,б):

$$A = \frac{iy_1^2}{2}; \quad \Delta A = \frac{i(y_1^2 - y_2^2)}{2};$$

$$\psi = 1 - e^{-2\lambda}. \quad (106)$$

2. Количество энергии A можно определять по амплитуде в середине цикла $y_{1,5}$ и для ψ получается иная зависимость:

$$\psi = e^{\lambda} - e^{-\lambda}. \quad (107)$$

Для простоты расчетов в обоих случаях рекомендуют использовать равенство $\psi \approx 2\lambda$, что допустимо только для малых λ : при $\lambda = 0,2$ в первом случае ошибка 16,5%, а во втором — 0,8%; при $\lambda = 1,0$ — соответственно 56,7% и 17,5%.

Относительное рассеяние энергии можно определять и по статической характеристике УС. На всех графиках (см. рис. 99) удвоенная площадь петли равна работе сил трения, т. е. равна рассеянию энергии ΔA . По чисто упругой характеристике I находится работа упругих сил, т. е. потенциальная энергия A .

Для приближенных исследований можно пользоваться известными значениями ψ [11]. Основное рассеяние энергии в металлорежущих станках происходит в сопряжениях деталей

($\psi \approx 0,1 \div 0,6$). Значительно меньше энергии рассеивается за счет внутреннего трения в материале деталей (для стали $\psi \leq 0,04$ и чугуна $\psi = 0,02 \div 0,3$).

§ 3. Динамика привода станков

При динамическом расчете привода определяют частоты собственных колебаний, максимальных динамических нагрузок при переходных процессах и близость к резонансу при установившемся процессе.

Составление расчетной схемы. Привод станка — сложная многозвенная ДС с распределенными массами. Основные ее параметры — массу, жесткость, неупругое сопротивление — конструктор или технолог не задают. Они могут быть определены только после тщательного анализа конструкции и условий ее эксплуатации. Поэтому переход к расчетной схеме — наиболее ответственный этап в решении задач динамики станков. Рассмотрим два случая составления схем.

1. *Привод с вращательным движением масс* (рис. 110). В качестве сосредоточенных масс принимаем детали $I \div 6$ длиной не более 1,5—2 их диаметров: ротор электродвигателя I_1 , патрон I_6 , шкивы I_2, I_3 и блоки зубчатых колес I_4, I_5 . (На рис. 110 I соответствует I в тексте). Моменты инерции распределенных масс валов $J_0, J_1 \dots J_{VI}$ приводят к моментам инер-

ции сосредоточенных масс привода [см. формулы (101) и (рис. 110,а)]:

$$I'_1 = I_1 + \frac{1}{6} J_0; \quad I'_2 = I_2 + \frac{1}{6} J_0;$$

$$I'_3 = I_3 + \frac{1}{6} J_1; \quad I'_4 = I_4 + \frac{1}{6} (J_1 + J_{II});$$

$$I'_5 = I_5 + \frac{1}{6} (J_{III} + J_{IV});$$

$$I'_6 = I_6 + \frac{1}{6} J_{IV}.$$

Крутильную податливость e_i участков валов между деталями и сопряжений (шкив — вал, шкив — ремень, ротор — статор и т. д.) определяют по известным формулам [11]. Для определения приведенных податливостей податливости участков вала (e_0, e_1, e_{IV}) суммируют с податливостями сопряжений ($e_1 \dots e_6$), прилегающих к данному участку: $e'_0 = e_0 + e_1 + e_2$; $e'_1 = e_1 + e_3 + e_4$; $e'_{IV} = e_{IV} + e_5 + e_6$.

Использование приведенных моментов и податливостей позволяет представить конструкцию привода в виде ступенчатой схемы (рис. 110,б). Передачи, изображенные штриховой линией, введены условно для обеспечения кинематической связи и поэтому лишены массы; e_p, e_k — податливости, соответственно ременной и зубчатой передач [11].

Многоступенчатая схема неудобна для расчета и ее преобразуют в линейную (рис. 110,в), для этого все массы и податливости приводят к одно-

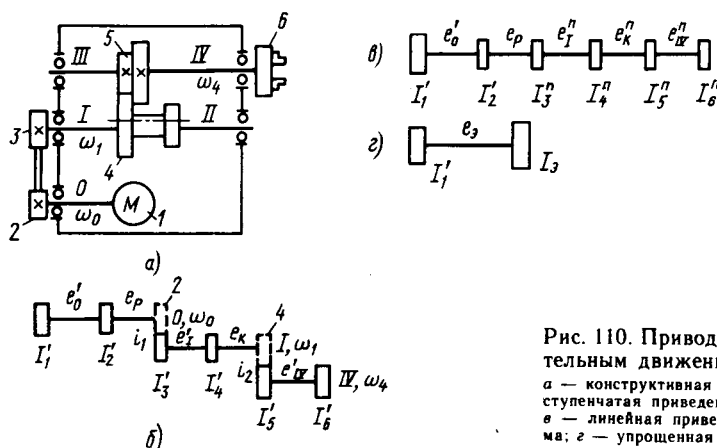


Рис. 110. Привод с вращательным движением масс: а — конструктивная схема; б — ступенчатая приведенная схема; в — линейная приведенная схема; г — упрощенная схема

му звену. В рассматриваемом случае моменты инерции $J'_3 - J'_6$ вращающихся масс с угловыми скоростями ω_1 и ω_4 приводят к валу O с угловой скоростью ω_0 (рис. 110, а, б). Приведенные моменты $J''_3 - J''_6$ находят из равенства кинетических энергий приведенных и заданных масс:

$$\frac{J'_3 \omega_1^2}{2} = \frac{J''_3 \omega_0^2}{2}, \dots, \frac{J'_6 \omega_4^2}{2} = \frac{J''_6 \omega_0^2}{2},$$

$$J''_3 = J'_3 \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} \right)^2 = J'_3 i_1^2; \dots;$$

$$J''_6 = J'_6 \left(\frac{\omega_4}{\omega_0} \right)^2 = J'_6 i_1^2 i_2^2.$$

Приведенные податливости e''_1, e''_k, e''_{IV} находим через передаточные отношения i_1, i_2 :

$$e''_1 = \frac{e'_1}{i_1^2}; e''_k = \frac{e'_k}{i_1^2}; e''_{IV} = \frac{e'_{IV}}{i_1^2 i_2^2}.$$

Приведение моментов и податливостей проводят для всех ступеней скорости.

Для привода станков диапазон частот возмущающих сил ограничен. Поэтому достаточно определить одну-две низшие собственные частоты, что позволяет упростить расчетную схему (рис. 110, в) до системы с одной-двумя степенями свободы. Приближенное упрощение предложено проф. А. П. Черевковым. Сущность метода заключается в том, что небольшие моменты инерции (в нашем случае $J'_2 - J'_6$) и податливости заменяют эквивалентным J_3, e_3 , а одну-две крупные массы (в нашем случае J'_1) —

сохраняют. Упрощенная двухмассовая система (рис. 110, г) имеет параметры

$$J_3 = J'_2 + J''_3 + J''_4 + J''_5 + J''_6;$$

$$e_3 = - \frac{e'_0 J'_2 + (e'_0 + e'_p) J'_3 + \dots + (e'_0 + e'_p + e''_1 + e''_k + e''_{IV}) J'_6}{J_3}.$$

Более строгое упрощение можно выполнить по методике [11]. Точность расчета собственных частот и форм колебаний достаточна, если за расчетный момент принять $M_p = 0,5 M_n$, где M_n — номинальный крутящий момент электродвигателя.

2. Привод с поступательным перемещением масс (рис. 111, а). Ползун 1, рычажную передачу 2 и толкатель 3 со всеми жестко связанными с ними деталями представим в виде сосредоточенных масс m_1, J_2, m_3 (рис. 111, б). Момент инерции для рычага прямоугольной формы сечением $a \times b$ и плечами r_1, r_2 рассчитывают по формуле

$$J_2 = \int_0^{r_1} r_1^2 ab \rho dr_1 + \int_0^{r_2} r_2^2 ab \rho dr_2 = \frac{ab\rho}{3} (r_1^3 + r_2^3) \text{ или}$$

$$J_2 = \frac{1}{3} (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2),$$

где ρ — плотность материала; m_1, m_2 — массы плеч рычага, $m_1 = ab r_1 \rho$, $m_2 = ab r_2 \rho$.

Жесткость ползуна j_1 и толкателя j_3 определяют в направлении их движения. При определении жесткости ползуна учитывают его собственную

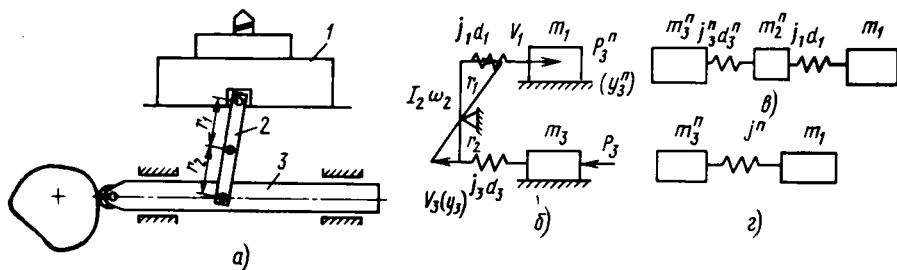


Рис. 111. Привод с поступательным перемещением масс:

а — конструктивная схема; б — ступенчатая приведенная схема; в, г — линейные приведенные схемы

жесткость j_c , жесткость соединения с рычагом j_p и жесткость рычага j_2 :

$$\frac{1}{j_1} = \frac{1}{j_c} + \frac{1}{j_p} + \frac{1}{j_2}.$$

Осевая жесткость толкателя зависит от жесткости соединений кулак — ролик (j_k), ось — ролик (j_0) и толкатель — рычаг (j_r):

$$\frac{1}{j_3} = \frac{1}{j_k} + \frac{1}{j_0} + \frac{1}{j_r}.$$

Ступенчатую схему (рис. 111, б) можно привести к линейной (рис. 111, в). Для этого момент J_2 рычага, вращающегося с угловой скоростью ω_2 , и массу толкателя m_3 , перемещающегося со скоростью v_3 , приводим к ползуну, скорость которого v_1 . В соответствии с равенством кинетических энергий приведенной m^n и действительной масс [50] находим:

$$m_3^n = m_3 \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 = m_3 i^2; \quad m_2^n = J_2 \left(\frac{\omega_2}{v_1^n} \right)^2,$$

$$\text{где } \frac{v_3}{v_1} = \frac{r_2}{r_1} = i; \quad v_1^n$$

— приведенная к ползуну линейная скорость, соответствующая угловой скорости ω_2 .

Приведенную жесткость j_3^n удобно в общем случае находить через отношение приведенной силы P_3^n и упругого смещения y_3^n . Действие силы P_3 со стороны толкателя вызывает упругое смещение элемента j_3 на величину y_3 (рис. 111, б):

$$P_3^n = P_3 \frac{r_2}{r_1} = P_3 i; \quad y_3^n = \frac{y_3}{i}; \quad j_3^n = j_3 i^2.$$

При пренебрежимо малой массе рычага расчетную схему можно представить в виде двухмассовой системы (рис. 111, з), где

$$j^n = \frac{j_1 j_3^n}{j_1 + j_3^n}.$$

Динамические нагрузки в приводе при переходных процессах. Несмотря на отсутствие рабочих нагрузок в станках при переходных процессах (пуск, торможение), элементы привода испытывают динамические нагрузки. Пред-

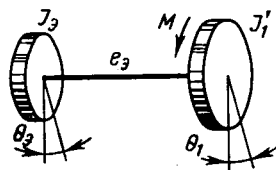


Рис. 112. Расчетная схема привода для определения динамических нагрузок при переходных процессах

положим, что в рассмотренной нами конструкции (см. рис. 110) двигатель развивает пусковой момент M . Обозначим углы поворота приведенных масс J'_1 , J_3 (рис. 110, з, рис. 112) через θ_1 и θ_3 . Тогда дифференциальные уравнения движения системы примут вид

$$J'_1 \ddot{\theta}_1 + j_3 (\theta_1 - \theta_3) = M;$$

$$J_3 \ddot{\theta}_3 - j_3 (\theta_1 - \theta_3) = 0,$$

где $\theta_1 - \theta_3 = \theta$ — угол закручивания вала или относительный угол поворота дисков. Умножим первое уравнение на J_3 , а второе на J'_1 и вычтем из первого второе:

$$\ddot{\theta} + \frac{j_3 (J'_1 + J_3)}{J'_1 J_3} \theta = \frac{M}{J'_1}. \quad (108)$$

Уравнение крутильных колебаний (108) по форме и решению аналогично уравнению колебаний при изгибе (90). Следовательно, коэффициент при θ характеризует собственную частоту крутильных колебаний системы p_k :

$$p_k^2 = \frac{J'_1 + J_3}{J'_1 J_3} j_3, \quad (109)$$

которую сопоставляют с частотой возмущения (например, с частотой вращения заготовки n , фрезы n_z и т. д.).

Неоднородное уравнение (108) в правой части содержит постоянную величину $\frac{M}{J'_1}$. Его решение отличается тем, что к решению однородной части уравнения добавляется статический угол закручивания от пускового момента M [39]:

$$\theta = A \sin p_k t + B \cos p_k t + \frac{M}{j},$$

где $j = J'_1 p_k^2$.

Из начальных условий ($t=0$, $\theta=0$). находим

$$A=0, B=-\frac{M}{J_1 p_k^2}, \theta=\frac{M}{J_1 p_k^2} \times \\ \times (1 - \cos p_k t).$$

Максимальный угол закручивания $\theta_{\max} = \frac{2M}{J_1 p_k^2}$, а максимальный динамический момент при пуске (торможении)

$$M_{\max} = j_3 \theta_{\max} = 2M \frac{J_3}{J_3 + J_1}.$$

Если тормозной момент приложен к J_3 , то

$$M_{\max} = 2M \frac{J_1}{J_1 + J_3}.$$

Пусковой момент двигателя определяют по формуле

$$M = 1,25 M_n = 12\,000 \frac{N}{n},$$

где M_n — номинальный момент двигателя, $M_n = 9500 \frac{N}{n}$; N — мощность двигателя; n — частота вращения.

§ 4. Критическая частота вращения шпинделя

Критическая частота вращения. Рассмотрим вал с вертикальной осью вращения и диском, центр тяжести (ЦТ) которого смещен на величину e (рис. 113, а). До разрушения вала центробежная сила F_u уравновешивается силой упругости F_y . Обозначим: m — масса диска; ω — угловая скорость вала; y , j — прогиб и жесткость вала (определяется по табл. 9). В соответствии с рис. 113, а

$$F_u = m\omega^2 (y + e), F_y = jy, \quad (110)$$

$$\frac{y}{e} = \frac{\omega^2 / p^2}{1 - \omega^2 / p^2}. \quad (111)$$

Из уравнения (111) следует, что прогиб вала растет с увеличением угловой скорости, которая достигает критического значения при равенстве с собственной круговой частотой коле-

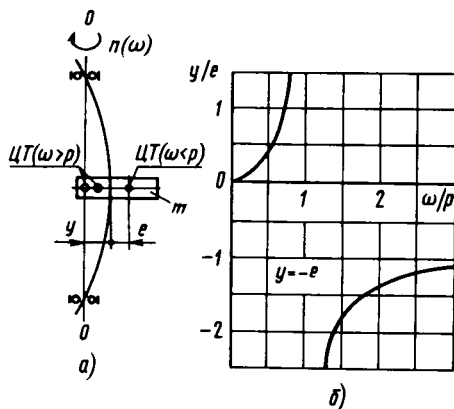


Рис. 113. Расчетная схема (а) и график (б) оценки критической частоты вращения

баний при изгибе: $\omega_{кр} = p$ (рис. 113, б). Критическая частота вращения вала

$$n_{кр} = \frac{30}{\pi} p = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{j}{m}}. \quad (112)$$

Следует подчеркнуть, что критическая частота вращения не зависит от эксцентритера e и не может быть изменена даже самой тщательной балансировкой.

При увеличении скорости вала выше критической ($\omega > p$) изменяется знак отношения y/e [см. формулу (111)], что свидетельствует о размещении ЦТ между осью вращения $O-O$ и осью вала. С дальнейшим увеличением ω прогиб уменьшается и, при $\omega \rightarrow \infty$ ЦТ совмещается с осью вращения: $y = -e$ (рис. 113, б).

Если $e=0$, то силы F_u и F_y одинаково зависят от прогиба y , и равновесие сохраняется при любом его значении: $jy = m\omega_{кр}^2 y$. При критической скорости вал не стремится восстанавливать свою форму, если какое-либо внешнее воздействие изменило ее.

Для двухопорного вала с K дисками минимальную критическую скорость можно определить по формуле Релея, зная массы (m_i) и статические прогибы (y_i) каждого из дисков (для определения y_i см табл. 9):

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g \sum_{i=1}^{i=k} m_i y_i}{\sum_{i=1}^{i=k} m_i y_i^2}},$$

где g — ускорение свободного падения.

Рабочую частоту вращения вала выбирают в пределах $1,3n_{кр} \leq n_p \leq 0,7n_{кр}$.

Влияние жесткости опор на критическую частоту вращения. Предположим, что вал с симметрично расположенным диском ($l_1 = l_2$, $R_1 = R_2 = R$) установлен на подшипниках одинаковой жесткости j_0 и ЦТ совмещен с осью вала, т. е. $e = 0$ (рис. 114). Под действием центробежной силы вал прогнется на y , а опоры — на y_0 от начального положения 1—1. Тогда уравнение (110) примет вид

$$F_{ц} = m\omega_{кр}^2 y, F_y = j(y - y_0). \quad (113)$$

Прогиб подшипников y_0 зависит от реакции опор R :

$$y_0 = \frac{R}{j_0} = \frac{F_{ц}}{2j_0}.$$

Подставим формулу для определения y_0 в уравнение (113) и, учитывая равенство сил $F_{ц} = F_y$, получим

$$F_y = j\left(y - \frac{F_{ц}}{2j_0}\right); F_{ц} = \frac{jy}{1 + \frac{j}{2j_0}}. \quad (114)$$

Найдем критическую частоту вращения с учетом жесткости опор:

$$n_{кр} = \frac{30}{\pi} \omega_{кр},$$

а, приравняв уравнения (113) и (114) для центробежной силы, получим

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{j}{m\left(1 + \frac{j}{2j_0}\right)}}. \quad (115)$$

Следовательно, критическая частота вращения снижается с уменьшением жесткости опор. Этим часто пользуются на практике и «выводят» критические скорости за пределы рабочего диапазона.

При различной жесткости опор в двух взаимно перпендикулярных направлениях X и Y для каждой формы колебаний будут две критические скорости. Для системы, подобной рис. 114, их определяют по формуле (115), придавая значения $j_0 = j_{0x}$ и $j_0 = j_{0y}$. Подробное исследование критических скоростей, траектории движения центра тяжести, деформации опор и изменения нагрузок в опорах в пределах одно-

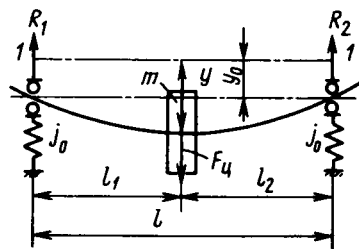


Рис. 114. Схема для определения критической частоты вращения вала с учетом податливости опор

го оборота вала и других параметров системы выполняют с помощью ЭВМ. Решение в общем виде можно получить с использованием уравнения Лагранжа

II рода: $\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} = 0$. Функцию Лагранжа L легко получить для каждой обобщенной координаты q_i , в качестве которой целесообразно принять координаты смещения опор (x_0 , y_0) и центра тяжести (x , y).

Дополнительные нагрузки в опорах вала. Неуравновешенность вращающихся деталей станков (дисбаланс) создает в опорах дополнительные радиальные нагрузки R . Эти силы «вращаются» вместе с валами, т. е. изменяют свое направление, создавая в опорах периодически изменяющуюся нагрузку, вызывая колебания.

Нагрузку R определяют по величине центробежной силы по формулам (110), (114). Из уравнений статики находим (см. рис. 114)

$$\text{при } j_0 = \infty \quad R_{1,2} = m\omega^2 (y + e) \frac{l_{2,1}}{l};$$

$$\text{при } j_0 \neq \infty \quad R_{1,2} = \frac{jy}{1 + \frac{j}{2j_0}} \frac{l_{2,1}}{l}.$$

С уменьшением жесткости опор уменьшаются и дополнительные нагрузки, что используется в некоторых конструкциях.

Для устранения дисбаланса удаляют часть металла со стороны эксцентриситета либо с противоположной стороны устанавливают груз G на радиусе r_0 , обеспечивая равенство центробежных сил:

$$\frac{G}{g} \omega^2 r_0 = m\omega^2 (y + e), \text{ отсюда}$$

$$Gr_0 = mg(y + e).$$

Величина Gr_0 характеризует дисбаланс, создаваемый грузом G , смещенным относительно оси идеально уравновешенного вала на r_0 .

Глава 16

Автоколебания в металлорежущих станках

§ 1. Динамические характеристики основных процессов в станках

При возникновении автоколебаний в ДС станков их амплитуда быстро нарастает (рис. 115), но через некоторое время стабилизируется в связи с изменением условий: проявляется нелинейность системы с ростом перемещений относительно состояния равновесия или нарушается контакт инструмента и заготовки [26].

Интенсивность автоколебаний неустойчивой динамической системы может быть различна, достигая некоторого предельного значения [39].

Устойчивость станков к возникновению автоколебаний определяют по характеристике разомкнутой ДС, описываемой формулой (74) (см. рис. 98, б). Для ЭУС по связи с резанием (при исследовании процесса резания)

$$W_{раз}(i\omega) = W_{ЭУС}(i\omega) W_{пр}(i\omega). \quad (116)$$

С методикой получения АФЧХ ЭУС мы ознакомились выше (см. гл. 14, § 3). Здесь остановимся только на АФЧХ процессов резания и трения.

При сборке станков осуществляют балансировку шпинделя со всеми сидящими на нем деталями. У шлифовальных станков шпиндель балансируют после каждой установки шлифовального круга.

Характеристика процесса резания. Установлено [26], что при ступенчатом изменении толщины среза a (рис. 116) сила резания P изменяется с некоторым отставанием по отношению к изменению a , постепенно достигая нового установившегося значения $P = K_p a$ (см. формулы (70), (79)). Отставание силы резания характеризуется постоянной времени стружкообразования $T_p = t_1$. В течение времени t_1 сила достигает 63% установившегося значения, т. е. $P = 0,63 K_p a$ (рис. 116).

Можно принять, что сила резания изменяется по экспоненциальному закону [26]. В теории автоматического регулирования это соответствует апериодическому звену [41]. Тогда динамический режим процесса резания как апериодического звена можно описать дифференциальным уравнением первого порядка относительно выходной координаты P :

$$T_p \frac{dP}{dt} + P = K_p a,$$

или в операторной форме

$$(T_p p + 1) P(p) = K_p a(p).$$

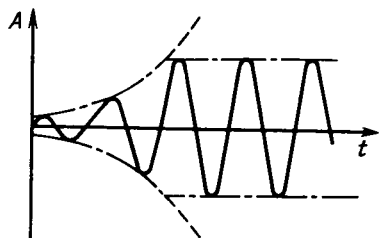


Рис. 115. Изменение во времени амплитуды автоколебаний

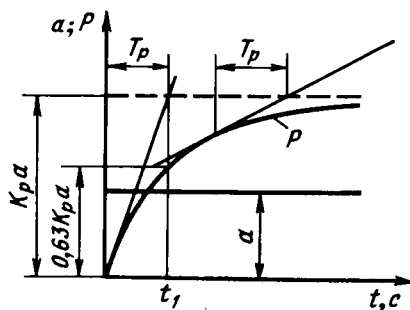


Рис. 116. Временная динамическая характеристика процесса резания

Отсюда находим передаточную функцию процесса резания

$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{P(p)}{a(p)} = \frac{K_p}{1 + T_p p} \quad (117)$$

Для построения АФЧХ ПР, как и для ЭУС (86), запишем характеристику в частотной форме ($p = i\omega$):

$$W_{\text{пр}}(i\omega) = \frac{K_p}{1 + T_p^2 \omega^2} - i \frac{K_p T_p \omega}{1 + T_p^2 \omega^2} \quad (118)$$

При $\omega = 0$ получим статическую характеристику резания (79). Модуль характеристики A_{1p} (рис. 117) равен отношению амплитуд силы резания и толщины среза, а φ_{1p} — сдвиг по фазе между ними.

Динамическая характеристика резания (рис. 117) построена по уравнению (118):

$$\text{при } \omega = 0 \quad \text{Re} = K_p, \text{Im} = 0, \varphi = 0;$$

$$\text{при } \omega = \frac{1}{T_p} \quad \text{Re} = \frac{K_p}{2}, \text{Im} = \frac{K_p}{2},$$

$$\varphi = \pi/4;$$

$$\text{при } \omega = \infty \quad \text{Re} = 0, \text{Im} = 0, \varphi = \pi/2.$$

Постоянную времени стружкообразования T_p можно определить по формуле [26]

$$T_p = \frac{m}{n} \frac{a_0 \zeta}{v},$$

где $\frac{m}{n}$ характеризует ζ с изменением a , для стали $\frac{m}{n} \approx 1 \div 1,5$; a_0 — толщина среза; ζ — среднее значение усадки стружки; v — скорость резания. Наиболее точно T_p определяют

экспериментально по касательной к экспоненте (см. рис. 116).

Динамическая характеристика (118) получена без учета изменения переднего и заднего углов в процессе резания и справедлива для области автоколебаний до $3 \cdot 10^3$ Гц и среднем значении усадки стружки $\zeta = 2,5$ (для стали $\zeta = 2,5 \div 4,5$). Причем характеристика может быть построена только для собственно устойчивого процесса резания, т. е. при устойчивом стружкообразовании (сливной стружке).

Физически обоснованное выражение динамической характеристики ПР может быть получено из анализа полного выражения силы резания [26].

Характеристика процесса трения. При изменении во времени входных координат — скорости скольжения v и нормальной деформации y_n — сила трения F по отношению к ним имеет сдвиг по фазе. Это установлено многочисленными экспериментами по измерению коэффициента трения μ или силы трения F при малых перемещениях. Рассмотрим природу этого явления применительно к контактному трению. Пусть для некоторого скользящего выступа, деформирующего поверхность трения (рис. 118) скачкообразно изменяется нормальная контактная деформация y_n (от положения 1 к положению 2). Как и при резании со ступенчатым изменением припуска, новое предельное напряженное состояние возникает не мгновенно, а в течение времени движения на пути l_0 благодаря деформированию металла перед выступом и изменению площади контакта. Сила трения возрастет до нового установившегося значения F_0 , соответ-

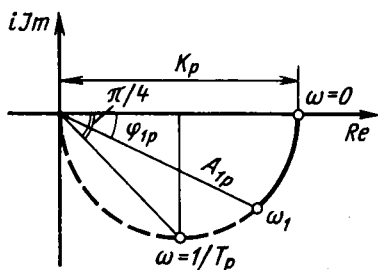


Рис. 117. АФЧХ процесса резания

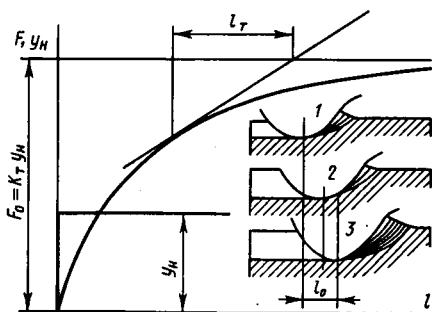


Рис. 118. Временная характеристика процесса трения

ствующего новой величине нормальной контактной деформации (положение 3).

Аппроксимируя, как и ранее, изменение силы трения экспонентой, приходим снова к аperiодическому звену. При постоянной скорости скольжения v постоянную времени предварительного смещения T_T можно представить в виде отношения (см. рис. 118)

$$T_T = \frac{l_T}{v}. \quad (119)$$

По аналогии с уравнениями (117) и (118) запишем для контактного трения выражение передаточной функции в ее простейшем виде:

$$W_{\text{ПТ}}(p) = \frac{F(p)}{y(p)} = \frac{K_T}{T_T p + 1}. \quad (120)$$

где K_T — статическая характеристика ПТ и динамической характеристики,

$$W_{\text{ПТ}}(i\omega) = \frac{K_T}{1 + T_T^2 \omega^2} - i \frac{K_T T_T \omega}{1 + T_T^2 \omega^2}. \quad (121)$$

По форме динамическая характеристика ПТ имеет тот же вид, что и характеристика ПР (см. рис. 117). При жидкостном трении динамическая характеристика ПТ имеет другую природу; она отражает гидродинамический эффект смазки.

Физический смысл запаздывания силы трения от скорости скольжения можно объяснить тем, что при резком изменении скорости стола сила его инерции, вязкое сопротивление смазки и заполнение смазкой зазора между трущимися поверхностями не позволяют столу мгновенно изменить положение в соответствии с новой скоростью движения, причем всплыванию стола могут сопротивляться и упругие силы. Следовательно, характеристика будет включать элементы ПТ и УС.

Анализ характеристик ПР и ПТ показывает, что для них характерны свойства ортогональности и инерционности, т. е. возникающие в подвижном соединении тангенциальные силы зависят от относительных смещений, измеренных по нормальям к этим силам, и отстают во времени от вызвавших это смещение параметров.

§ 2. Автоколебания в станках при потенциально-устойчивой упругой системе

Если доминирующей динамической системой станка является шпиндельный узел, то расчетную схему ЭУС можно представить в виде системы с одной степенью свободы (см. рис. 101), а устойчивость определять по уравнению (116). Рассмотрим два случая.

Статическая характеристика резания. Используя результаты расчета АФЧХ ЭУС по формуле (87), построим характеристику для конкретных параметров ДС станка (параметры взяты для шпиндельного узла станка попутного течения с волновым зубчатым приводом подачи):

$$j = 172 \cdot 10^3 \text{ Н/мм};$$

$$K_{\text{ЭУС}} = 5,81 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н};$$

$$f_c = 650 \text{ Гц}; \quad T_1 = \sqrt{\frac{m}{j}} = \frac{1}{2\pi f_c} = 0,246 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \lambda = 0,315;$$

$$T_2 = \frac{b}{j} = T_1 \frac{\lambda}{\pi} = 2,47 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Полученная характеристика $W_{\text{ЭУС}}$ (рис. 119) не пересекает отрицательную вещественную ось, т. е. ЭУС потенциально устойчива.

Для построения характеристики разомкнутой системы $W'_{\text{1раз}}$ в соответствии с правилами действия над комплексными числами увеличим модуль $A_{\text{ЭУС}}$ в K_p раз, не изменяя фазы $\varphi_{\text{ЭУС}}$:

$$W'_{\text{1раз}} = W_{\text{ЭУС}} K_p; \quad A'_{\text{раз}} = A_{\text{ЭУС}} K_p; \quad \varphi_{\text{раз}} = \varphi_{\text{ЭУС}}. \quad (122)$$

Характеристика $W'_{\text{1раз}}$ отличается от $W_{\text{ЭУС}}$ только масштабом изображения и также не пересекает отрицательную вещественную ось. Следовательно, при статической характеристике резания станок всегда будет виброустойчивым, если его ЭУС можно представить в виде системы с одной степенью свободы.

Динамическая характеристика резания. На рис. 119 характеристика $W_{\text{ПР}}$ построена для параметров $K = 2000 \text{ Н/мм}^2$, $b = 15 \text{ мм}$ $K_p = Kb = 30\,000 \text{ Н/мм}$; $v = 3,6 \text{ м/с}$; $a_0 =$

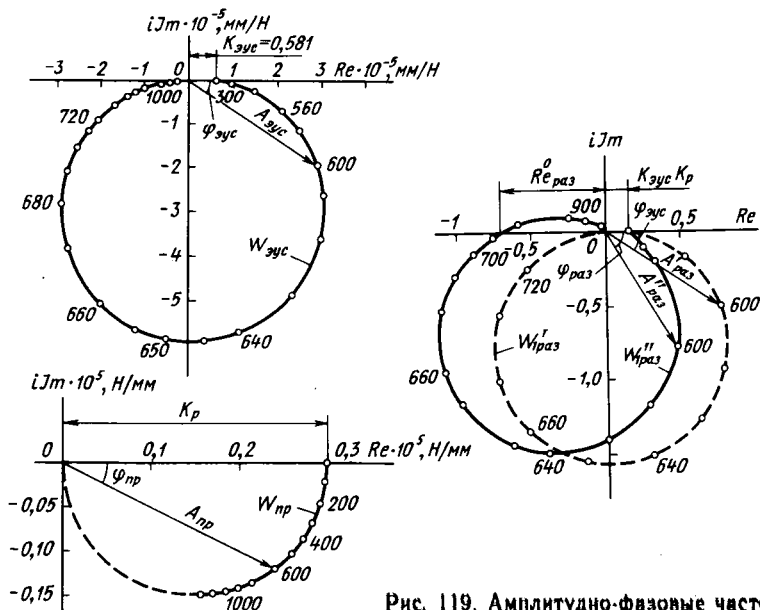


Рис. 119. Амплитудно-фазовые частотные характеристики ЭУС, ПР и разомкнутой динамической системы $W_{\text{раз}}$ по связи с резанием.

$= 0,152$ мм; $\xi_0 = 3$; $\frac{m}{n} = 1$; $T_p = 1,26 \times 10^{-4}$ с.

По условиям действия над комплексными числами модуль разомкнутой характеристики $A_{\text{раз}}$ равен произведению модулей $A_{\text{эус}}$ и $A_{\text{пр}}$, а фазы складываются:

$$W'_{\text{раз}} = W_{\text{эус}} W_{\text{пр}}; A_{\text{раз}} = A_{\text{эус}} A_{\text{пр}};$$

$$\varphi_{\text{раз}} = \varphi_{\text{эус}} + \varphi_{\text{пр}}.$$

Характеристика разомкнутой системы $W'_{\text{раз}}$ пересекает отрицательную вещественную ось, и динамическая система станка потенциально неустойчива, т. е. при увеличении каких-либо постоянных параметров, например ширины резания b , станок может потерять устойчивость. В рассматриваемом случае станок виброустойчив, так как соблюдается условие (89).

Предельная ширина резания $b_{\text{пр}}$ находится из общего выражения характеристики $W'_{\text{раз}}$. Из совместного решения уравнений (116), (87) и (118) находим

$$W'_{\text{раз}} = \frac{K_{\text{эус}} K_p (1 - T_1^2 \omega^2 - T_2 T_p \omega^2) -}{[(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2]} \times \frac{-K_{\text{эус}} K_p i \omega [T_2 + (1 - T_1^2 \omega^2) T_p]}{\times (1 + T_p^2 \omega^2)}. \quad (123)$$

Из граничного условия устойчивости Найквиста

$$\begin{aligned} \text{Re}_{\text{раз}}^0 = -1 = & \frac{K_{\text{эус}} K_b \text{пр} [1 - T_1^2 \omega^2 - T_2 T_p \omega^2]}{[(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2] (1 + T_p^2 \omega^2)}; \\ b_{\text{пр}} = & \frac{[(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2] (1 + T_p^2 \omega^2)}{K_{\text{эус}} K [T_2 T_p \omega^2 - 1 + T_1^2 \omega^2]}. \end{aligned} \quad (124)$$

Если учесть принятые обозначения T_1 и T_2 , то из уравнений (124) следует, что повышение жесткости системы увеличивает предельную ширину резания, т. е. увеличивает виброустойчивость станка. Это справедливо всегда, когда речь идет о повышении собственной жесткости элементов конструкции станка. Повышение же технологической жесткости ДС повышает виброустойчивость только в том случае, если оно достигнуто без изменения демпфирования и связей в системе для одной и той же формы колебаний. Например, затяжка стыков повышает жесткость системы, но снижает демпфирование, и виброустойчивость может снижаться. Требование высокой жесткости в первую очередь относится к шпинделям и суппортам, которые чаще всего лимитируют жесткость ДС.

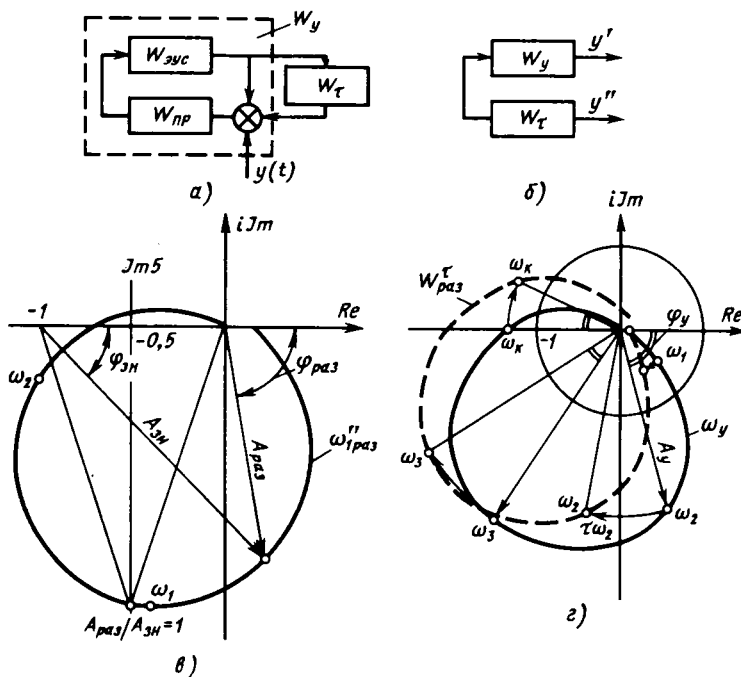


Рис. 120. Динамическая система станка при обработке по следу и ее АФЧХ:

а — схема динамической системы станка по связи с резанием при обработке по следу; б — характеристика разомкнутой системы с элементом запаздывания W_τ ; в, г — построение характеристики разомкнутой системы $W_{\text{раз}}$

При выводе формул (123), (124) предполагали, что поверхность обрабатываемой заготовки возникли микроволны, то при последующих проходах они могут стать причиной возникновения автоколебаний.

При точении по следу создается дополнительная обратная связь с запаздыванием, которую можно учесть добавлением к динамической системе станка элемента запаздывания W_τ (рис. 120, а):

$$W_{\text{раз}}^\tau = W_y W_\tau, \quad (125)$$

где W_y — характеристика замкнутой системы по изменению настройки, состоящей из элементов ЭУС и ПР и определяемой по характеристике разомкнутой системы $W_{\text{раз}}$:

$$W_y = \frac{W_{\text{раз}}}{1 + W_{\text{раз}}}; \quad W_{\text{раз}} = W_{\text{ЭУС}} W_{\text{ПР}}; \quad (126)$$

W_τ — характеристика элемента запаздывания, известная из теории автоматического регулирования;

$$W_\tau = e^{-\rho\tau}, \quad (127)$$

здесь τ — постоянная времени запаздывания, равная для токарных станков времени одного оборота заготовки $\tau = \frac{1}{n}$; n — частота вращения шпинделя.

Для определения W_y воспользуемся характеристикой разомкнутой системы $W_{\text{раз}}^\tau$ (см. рис. 119), данной на рис. 120, в. Согласно правилам деления комплексных чисел модуль A_y найдем через отношение модулей $A_{\text{раз}}$ и A_{3n} , а фазу φ_y — через разность фаз этих модулей:

$$A_y = \frac{A_{\text{раз}}}{A_{3n}}; \quad \varphi_y = \varphi_{\text{раз}} - \varphi_{3n},$$

где A_{3n} , φ_{3n} берут из построения. Построение W_y выполнено на рис. 120, г.

АФЧХ элемента запаздывания представляет собой окружность единичного радиуса с центром в начале координат. Поэтому для построения характеристики $W_{\text{раз}}^\tau$ достаточно каждую точку характеристики W_y сместить по окружности радиусом, равным модулю характеристики в этой точке по часовой стрелке на угол $\varphi = \tau\omega_k$ (рис. 120, з).

Критерий Найквиста применяют и в этом случае. Система устойчива, если характеристика $W_{\text{раз}}^T$ не охватывает точку $(-1, 0; i0)$.

Из построения $W_{\text{раз}}^T$ следует, что динамическая система всегда устойчива, если характеристика эквивалентного элемента W_y вписывается в окружность единичного радиуса с центром в начале координат, т. е. когда модуль характеристики меньше единицы ($A_y < 1$). Если характеристика W_y пересекает окружность единичного радиуса, то система устойчива только в некотором частотном диапазоне или при некоторых изменениях t .

Представляет интерес сравнение устойчивости систем, имеющих элемент запаздывания, с дополнительной обратной связью и без него. Оказывается, что при наличии элемента запаздывания система устойчива, если характеристика $W_{\text{раз}}''$ расположена справа от прямой, проходящей через точку $(-0,5; i0)$, т. е. область устойчивости и предельная ширина срезаемой стружки уменьшаются не менее чем в 2 раза.

Действительно, для точек характеристики $W_{\text{раз}}''$, лежащих на прямой Im_s , всегда справедливо равенство (рис. 120, в) $A_y = \frac{A_{\text{раз}}}{A_{\text{эн}}} = 1$, а для точек, лежащих справа от прямой, $A_y < 1$, т. е. модуль лежит внутри единичной окружности, и система устойчива (рис. 120, г). Из построения видно, что в нашем случае система устойчива лишь в некотором частотном диапазоне.

§ 3. Автоколебания в станках при потенциально неустойчивой упругой системе

Эллипс жесткости. Если на суппорте токарного станка установить уровень l (рис. 121) и изменять угол приложения силы P_1 , то можно найти такой угол α_1 , при котором уровень не покажет угловых смещений, т. е. не будет поворота резцедержателя. При изменении точки приложения силы аналогичное условие получим при новом угле α_2 . Точка пересечения линий действия сил P_1 и P_2 определяет положение центра жесткости (ЦЖ) суппорта. Направление от вершины резца к центру жесткости соответствует минимальным упругим смещениям и называется осью максимальной жесткости j_1 . Направление, перпендикулярное первому, соответствует максимальным упругим смещениям и называется осью минимальной жесткости j_2 , так как к упругим смещениям вдоль оси добавляются смещения из-за крутильной податливости суппорта вокруг ЦЖ. Оси x_1 и x_2 называют главными осями жесткости, или осями эллипса жесткости. Если нагрузка проходит через центр жесткости, то УС смещается только по главным осям жесткости. Главные оси жесткости являются нормальными координатами, т. е. такими, перемещения по которым независимы. Поэтому для каждой нормальной координаты ЭУС суппорта составляют независимые дифференциальные уравнения и сложную ЭУС представляют в виде системы параллельно

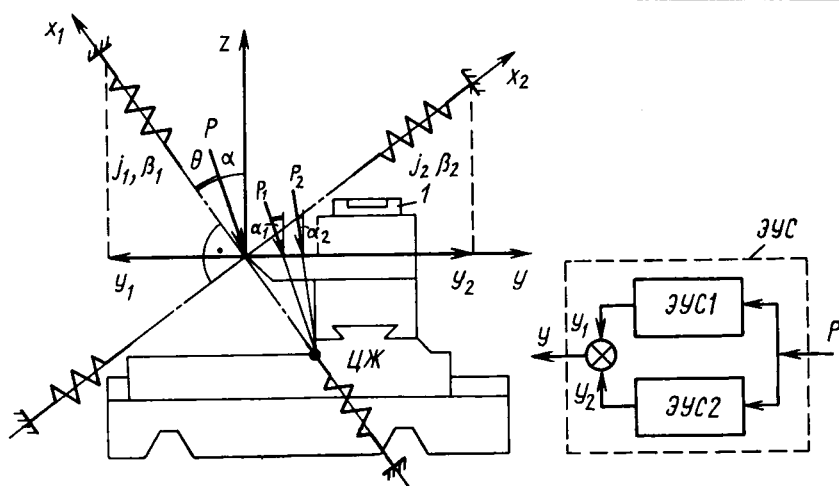


Рис. 121. Расчетная схема ЭУС с двумя степенями свободы

соединенных элементов ЭУС₁ и ЭУС₂ (рис. 121). Входной координатой будет одна для всех элементов нагрузка P , а выходной — перемещение ЭУС: $y = y_1 + y_2$.

Теория координатной связи. Изложенное представление о центре жесткости системы и главных осях жесткости положено в основу расчета устойчивости сложной ЭУС, имеющей не менее двух степеней свободы. Оказалось, что только в этом случае не теряются принципиально важные свойства упругой системы.

Направим обобщенные координаты суппорта по главным осям жесткости x_1 и x_2 (рис. 121). В соответствии с индексами координат обозначим линейные характеристики жесткости j_1, j_2 , сопротивление β_1, β_2 , приведенные массы m_1, m_2 . Внешняя нагрузка P действует как сила резания. Тогда ЭУС может быть представлена в виде системы двух уравнений:

$$m_1 \ddot{x}_1 + \beta_1 \dot{x}_1 + j_1 x_1 = P \cos \theta;$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + \beta_2 \dot{x}_2 + j_2 x_2 = P \sin \theta$$

или в операторной форме:

$$\begin{aligned} (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) x_1(p) &= \\ &= P(p) \cos \theta \frac{1}{j_1}; \\ [(T_1^2)^2 p^2 + T_2' p + 1] x_2(p) &= \\ &= P(p) \sin \theta \frac{1}{j_2}. \end{aligned} \quad (128)$$

Для определения передаточной функции $W_{\text{ЭУС}}$ найдем упругое смещение $y(p)$, измеренное по нормали к поверхности резания, через x_1, x_2 (рис. 121):

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \text{ или } y = -x_1 \sin(\alpha + \theta) + \\ &+ x_2 \cos(\alpha + \theta). \end{aligned} \quad (129)$$

Подставим значения x_1, x_2 из системы (128) в уравнение (129):

$$\begin{aligned} y(p) &= \frac{P(p) \sin \theta \cos(\alpha + \theta)}{j_2 [(T_1^2)^2 p^2 + T_2' p + 1]} - \\ &- \frac{P(p) \cos \theta \sin(\alpha + \theta)}{j_1 (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)}. \end{aligned}$$

Обозначим $\sin \theta \cos(\alpha + \theta) = e_2$, $\cos \theta \sin(\alpha + \theta) = e_1$ и запишем в развернутом виде передаточную функцию

системы:

$$\begin{aligned} W_{\text{ЭУС}} &= \frac{e_2}{j_2 [(T_1^2)^2 p^2 + T_2' p + 1]} - \\ &- \frac{e_1}{j_1 (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)}. \end{aligned} \quad (130)$$

При $p=0$ получим статическую характеристику

$$K_{\text{ЭУС}} = \frac{e_2}{j_2} - \frac{e_1}{j_1}. \quad (131)$$

Из уравнений (130) и (131) видно, что динамическая и статическая характеристики рассматриваемой системы зависят от положения нагружающей силы относительно осей координат, т. е. от α и θ . При $\theta=0$ характеристика системы равна характеристике одной нормальной форме ЭУС.

Запишем передаточную функцию (130) в частотной форме:

$$\begin{aligned} W_{\text{ЭУС}} &= \frac{e_2}{j_2 [- (T_1')^2 \omega^2 + T_2' i \omega + 1]} - \\ &- \frac{e_1}{j_1 (-T_1^2 \omega^2 + T_2 i \omega + 1)} = \\ &= \frac{e_2 [1 - (T_1')^2 \omega^2]}{j_2 \{ [1 - (T_1')^2 \omega^2]^2 + (T_2')^2 \omega^2 \}} - \\ &- i \frac{e_2 T_2' \omega}{j_2 \{ [1 - (T_1')^2 \omega^2]^2 + (T_2')^2 \omega^2 \}} - \\ &- \frac{e_1 (1 - T_1^2 \omega^2)}{j_1 [(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2]} + \\ &+ i \frac{e_1 T_2 \omega}{j_1 [(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2]}. \end{aligned} \quad (132)$$

в общем виде:

$$\begin{aligned} W_{\text{ЭУС}} &= \text{Re}_{\text{ЭУС}2} - i \text{Im}_{\text{ЭУС}2} - \\ &- (\text{Re}_{\text{ЭУС}1} - i \text{Im}_{\text{ЭУС}1}); \\ W_{\text{ЭУС}} &= W_{\text{ЭУС}2} - W_{\text{ЭУС}1}. \end{aligned} \quad (133)$$

Характеристику каждой из нормальных форм ЭУС1 и ЭУС2 строим по формуле (132) так же, как на рис. 119. Но принципиальное отличие упругих систем, имеющих две и более степеней свободы, заключается в том, что суммирование положительных и отрицательных характеристик (133) дает АФЧХ ЭУС, которая пересекает отрицательную вещественную ось и, следо-

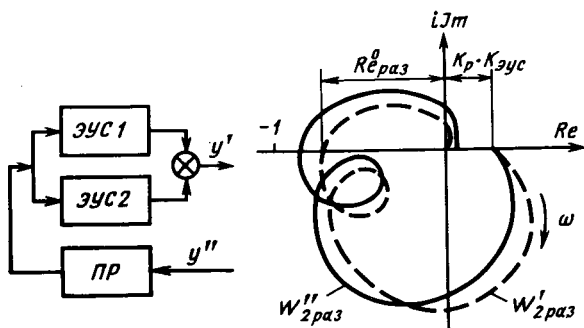


Рис. 122. Схема и характеристики разомкнутой динамической системы с двумя степенями свободы по связи с резанием

вательно, является потенциально неустойчивой (рис. 122). Поэтому даже при статической характеристике резания K_p характеристика разомкнутой системы $W'_{2\text{ раз}}$ будет потенциально неустойчивой (рис. 122), так как она отличается от $W_{\text{эус}}$ только масштабом изображения: $W'_{2\text{ раз}} = W_{\text{эус}} K_p$.

Важно подчеркнуть, что при статической характеристике резания основное влияние на устойчивость системы оказывает конструкция ЭУС. Частным доказательством этого служит превращение сложной системы, описываемой уравнением (130), в систему с одной нормальной формой колебаний при $\theta = 0$, т. е. в потенциально устойчивую систему. На рис. 123 показано изменение экспериментальных АФЧХ ЭУС станка мод. 16К20 в зависимости от зазора Δ в переднем подшипнике шпинделя. Из характеристик видно, что амплитуда колебаний на резонансной частоте может изменяться в несколько раз в зависимости от величины зазора. В частности, при больших зазорах ($\Delta = 17,5$ мкм) неоправданно аппроксимировать ЭУС уравнением второго порядка, так как АФЧХ отсекает большой отрезок на отрицательной вещественной оси.

С учетом динамической характеристики резания $W_{\text{пр}}$ характеристика разомкнутой системы $W''_{2\text{ раз}}$ будет отличаться от $W_{\text{эус}}$ не только масштабом, но и фазовым смещением, с учетом которого она и построена на рис. 122. Чем больше отрезок $Re^0_{\text{эус}}$, отсека-

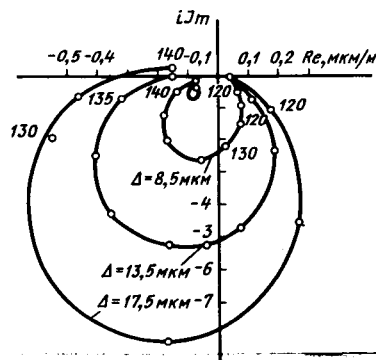


Рис. 123. Экспериментальные АФЧХ ЭУС станка мод. 16К20 в зависимости от зазора Δ в переднем подшипнике шпинделя

мый характеристикой ЭУС на отрицательной вещественной оси, тем меньше предельная ширина резания $b_{\text{пр}}$. Этот вывод следует из условия предела устойчивости системы $Re^0_{\text{раз}} = |1|$. При статической характеристике резания по условию построения $W'_{2\text{ раз}}$

$$Re^0_{\text{раз}} = Re^0_{\text{эус}} K_p = 1; b_{\text{пр}} = \frac{1}{Re^0_{\text{эус}} K} \quad (134)$$

Зависимость (134) показывает влияние эквивалентной упругой системы на повышение режимов резания и, следовательно, повышение производительности станков.

Анализ АФЧХ ЭУС с двумя степенями свободы, описываемой уравнением (132), с учетом динамической характеристики ПР показывает, что наибольшая устойчивость станков достигается при совпадении направления нагрузки с осью максимальной жесткости (см. рис. 121). Как в этом, так и в других случаях уменьшение радиус-вектора характеристики упругой системы всегда направлено на повышение виброустойчивости станков. Для этой цели рекомендуется повышение качества пригонки сопряженных поверхностей, в том числе контакта конусов центров и инструмента со шпинделями, прилегание резцов к опоре для повышения виброустойчивости в высокочастотном диапазоне и др.

Разнообразны приемы повышения виброустойчивости ДС за счет изме-

нения режимов обработки и геометрии инструмента, главным образом за счет устранения нароста, элементности стружки, ее усадки и др., воздействуя на динамическую характеристику ПР [26]. Низкочастотные вибрации можно устранить увеличением подачи на токарных станках, повышением и понижением скорости резания, уменьшением глубины резания. Для гашения высокочастотных вибраций применяют различные демпферы.

Условие устойчивости к «подрыванию» резцов может быть получено из уравнений (130) и (131) для $y > 0$. При $p = 0$ и статической характеристике ПР в соответствии с критерием устойчивости получим

$$1 + K_p K_{\text{ЭУС}} > 0; 1 - \frac{Kb}{j_1} \left(\frac{j_1}{j_2} \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \right) > 0,$$

Следовательно, устойчивость к «подрыванию» резцов увеличивается с уменьшением коэффициента резания K , с увеличением максимальной жесткости j_1 , уменьшением отношения жесткостей $\frac{j_1}{j_2}$ (см. рис. 121).

Рассмотренное решение потенциально неустойчивой системы, где ЭУС имеет две степени свободы, известно также под названием «Теории координатной связи» [26], которая учитывает статическую связь между обобщенными координатами. Физическую природу автоколебаний для подобного случая (потеря устойчивости) иллюстрирует рис. 124. Вершина резца относительно детали совершает колебания по эллипсу в результате сложения движений по главным осям жесткости, которые накладываются на равномерное движение со скоростью резания v . Вероятность этих движений обеспечивается большим

числом степеней свободы реальной системы.

Вследствие колебаний резца толщина среза непрерывно изменяется от $a_{\min}$ до $a_{\max}$. При этом важно отметить, что на первой стадии движения от A до B резец движется навстречу силе резания P , и система расходует часть энергии E_1 . На второй стадии движения от B до A направление движения резца совпадает с направлением силы резания. К системе добавляется энергия E_2 . Так как средняя толщина среза на втором участке больше, то $E_2 > E_1$, и система получила излишек энергии, которая идет на поддержание автоколебаний. Если фазовый сдвиг между движениями по координатам приводит к обратному направлению движения вершины резца, автоколебания не возникают. Система устойчива.

Следовательно, автоколебания поддерживаются переменной составляющей сил резания, которые сами возникают из-за установившегося колебательного процесса и исчезают вместе с процессом резания. Автоколебания развиваются на частоте, близкой к одной из собственных частот системы.

Предложенное объяснение возникновения автоколебаний является принципиально новым, доказано проф. В. А. Кудиновым [26]. Был обнаружен более мощный источник поддержания автоколебаний, чем падающая характеристика резания (падение силы резания с ростом скорости), которая ранее считалась одной из главных причин.

При многолезвовой обработке каждому резцу будет соответствовать свой элемент резания, и анализ системы будет выполнен по аналогии с рассмотренными. Исследования показали, что устойчивость систем при многолезвовой обработке возрастает с увеличением числа одновременно работающих резцов.

Наряду с автоколебаниями при резании в металлорежущих станках часто наблюдаются релаксационные автоколебания при перемещении столов, стоек, ползунов и т. п. В зависимости от жесткости привода и условий трения размах колебаний изменяется в широком диапазоне и в отдельных случаях в тяжелых продольно-фрезерных, горизонтально-расточных и других станках достигает 0,3—0,8 мм. Для ис-

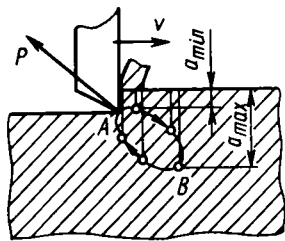


Рис. 124. Траектория относительного перемещения вершины резца при автоколебаниях

следования этой разновидности автоколебаний сохраняется методический подход, который был изложен выше [26].

Релаксационные автоколебания приводят к скачкообразному перемещению элементов станков и влияют на погрешность установочных перемещений,

точность обработки, стойкость инструмента и шероховатость поверхности. Снижение амплитуды колебаний достигается повышением жесткости привода, применением специальных смазок, разгрузкой направляющих и снижением веса подвижных частей станка.

Глава 17

Экспериментальные методы исследования динамической системы станков

§ 1. Средства измерения параметров динамической системы станков

Структурная схема измерения параметров ДС станка включает (рис. 125) измерительный преобразователь ИП, усилитель У, регистрирующий измерительный прибор РП и блок питания БП. Преобразователь (датчик) предназначен для образования измерительного сигнала, т. е. он преобразует неэлектрические параметры (длину, механические напряжения, температуру и др.) в электрические (напряжение, ток и др.). Первые характеризуют воздействие на ИП и называются входными параметрами, вторые — результат воздействия и называются выходными параметрами.

Одной из основных характеристик преобразователя является чувствительность:

$$S = \frac{H}{N} = \frac{\Delta I}{\delta p}, \text{ или } S = \operatorname{tg} \alpha, \quad (135)$$

где H — изменение выходного параметра; N — изменение входного параметра; α — угол наклона касательной.

Преобразователь высокой чувствительности, как правило, имеет малый рабочий диапазон измерения и наоборот (сравните характеристики рис. 129, б и 129, а).

К числу важных технических характеристик преобразователей относятся также диапазон рабочих частот, температур и чувствительность к различным помехам: электрическим и магнитным полям, механическим напряжениям, акустическим шумам и т. п. При использовании нестандартных преобразователей во избежание ошибок

характеристики необходимо проверять самостоятельно.

В экспериментальных исследованиях ДС станков преимущественное распространение получили преобразователи двух групп, работающие по принципу: I) электрического сопротивления и II) электрического генератора.

У преобразователей группы I неэлектрическое воздействие N (рис. 126, а) вызывает изменение электрического сопротивления R . Вследствие этого изменяется ток I в электрической цепи, питаемой стабилизированным источником напряжения E . Изменение тока регистрирует прибором мА.

Преобразователи второй группы непосредственно преобразуют неэлектрическое воздействие N в электрическое напряжение E (рис. 126, б). Специальный источник электрической энергии от-

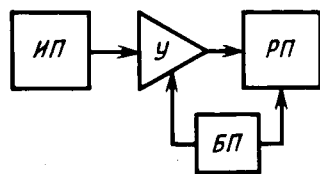


Рис. 125. Структурная схема измерения параметров ДС станка

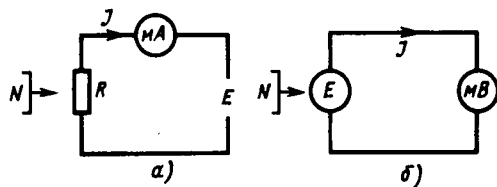


Рис. 126. Принципиальные схемы работы преобразователей:

а — группа электрического сопротивления; б — группа электрического генератора

существует. Изменение напряжения регистрируется прибором мВ.

Устройство и основные характеристики преобразователей группы I. Представителями преобразователей этой группы являются проволочные, реже фольговые тензопреобразователи. Они представляют собой плоские элементы R_1 и R_2 (рис. 127, а) состоящие из двух склеенных слоев тонкой бумаги и петлеобразно расположенной между ними проволоки диаметром 15—30 мкм. Наклеенные на какую-либо нагружаемую деталь преобразователи деформируются вместе с металлом. Изменяется поперечное сечение, длина и удельное сопротивление проволоки, а следовательно, и ее первоначальное сопротивление R на величину ΔR :

$$\Delta R = RS_0 \epsilon \text{ или } S_0 = \frac{\Delta R}{R\epsilon}, \quad (136)$$

где S_0 — относительная чувствительность материала проволоки; ϵ — относительное изменение длины проволоки.

Изменение сопротивления тензопреобразователя и ток в измерительной цепи пропорциональны напряжению металла в местах наклейки. Поэтому с его помощью можно измерять силы, перемещения, давления, ускорения и т. д.

Акселерометром (рис. 127, а) с помощью тензопреобразователей R_1 , R_2 можно измерять вертикальное ускорение $\ddot{y}$ детали. Сила инерции $F = m\ddot{y}$ изгибает пружину 2 и вызывает на-

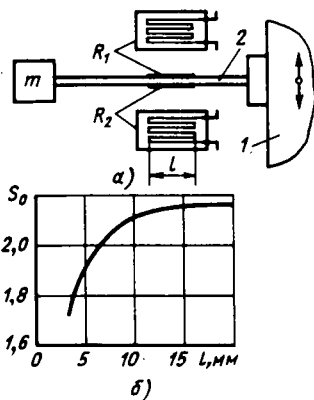


Рис. 127. Проволочный тензопреобразователь:

а — схема акселерометра; б — графики изменения чувствительности тензопреобразователя S_0 в зависимости от длины базы l

пряжение σ , пропорциональное массе m и ускорению: $\sigma \equiv F \equiv \ddot{y}$.

Тензопреобразователи различают по величине сопротивления R и базы l . Относительная чувствительность повышается с увеличением базы до 15 мм (рис. 127, б). Рекомендуется выбирать $l = 5 \div 20$ мм.

Для заданного материала величина S_0 практически постоянна. Благодаря этому можно исключить непосредственную тарировку тензометрического устройства, используя формулу (136) и зависимость σ от модуля упругости E :

$$\sigma = \epsilon E = E \frac{\Delta R}{RS_0}.$$

Все шире применяют полупроводниковые преобразователи, в том числе тензорезисторы, у которых при деформации изменяется удельное сопротивление. Их относительная чувствительность в десятки раз выше, чем проволочных.

Для измерения малых перемещений бесконтактным методом применяются индуктивные преобразователи. Принцип их работы состоит в изменении сопротивления магнитопровода с изменением воздушного зазора магнитной цепи или магнитной проницаемости железного сердечника, входящего в магнитную цепь.

Индуктивность L электромагнитной системы, содержащей обмотку и ферромагнитный сердечник с небольшим воздушным зазором δ , зависит от числа витков w , активного магнитного сопротивления сердечника $R_{ж}$, магнитного сопротивления воздушного зазора R_δ и реактивной составляющей магнитного сопротивления x_m , обусловленной вихревыми токами и потерями на гистерезис:

$$L = \frac{w^2}{\sqrt{(R_{ж} + R_\delta)^2 + x_m^2}}.$$

Все эти параметры могут быть положены в основу построения различных индуктивных преобразователей.

Конструкция бесконтактного индуктивного преобразователя с ферритным сердечником для исследования колебаний столов, суппортов и вращающихся шпинделей приведена на рис. 128, а. Сопротивление магнитопровода изменя-

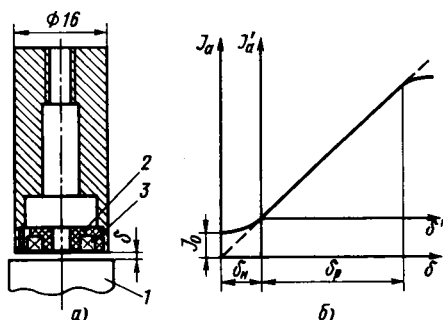


Рис. 128. Индуктивный бесконтактный преобразователь с ферритовым сердечником:
а — конструкция; б — характеристика

ется с изменением зазора δ между ферритовым сердечником 2 и колеблющейся деталью 1, которая выполняет роль якоря. Катушка 3 имеет 400 витков из проволоки ПЭЛ—0,1 мм. Чувствительность преобразователя в комплекте с усилителем ТА-5 и осциллографом Н-700: в статике $S=10 \div 20$ мм/мкм; на частоте исследуемого процесса 100 Гц $S=7 \div 14$ мм/мкм (для схемы включения по рис. 129, а). В качестве выходного параметра здесь принято перемещение «зайчика» на экране осциллографа, пропорциональное току преобразователя.

Индуктивные преобразователи имеют малый участок линейной характеристики — рабочий участок δ_p (рис. 128, б). При $\delta=0$ в системе есть остаточный ток I_0 . Поэтому при исследовании устанавливают начальный зазор δ_n , с которого начинается линейная характеристика (система координат $I'_a = \delta'$).

Свойство ферромагнитных материалов изменять свою магнитную проницаемость под действием создаваемых в них механических напряжений используется для создания магнитоупругих индуктивных преобразователей [53]. Их применяют для измерения крутящих моментов, малых перемещений в станках с ЧПУ. Здесь роль сердечника обычно выполняет какая-либо конструкционная деталь, передающая нагрузку и выполненная специально из ферромагнитного материала (пермаллой и др.).

Контактные измерительные приборы с индуктивными преобразователями используют для статических измерений или при небольших скоростях и ускорениях.

Схема включения преобразователей. Для повышения чувствительности преобразователи первой группы включают по мостовой схеме (рис. 129). Преобразователи, которые изменяют свое сопротивление под воздействием входных параметров, называют активными ($+R_i$, $-R_i$), если они не изменяют сопротивление, — пассивными (R_0).

Чувствительность мостовой схемы определяется отношением тока I_0 в измерительной диагонали к входному параметру. Величина тока зависит от напряжения на диагонали моста U , от числа активных преобразователей, изменения их сопротивления ΔR и способа включения в мостовую схему (рис. 129, в, см. индексы при R внутри мостовой схемы). Величину тока для рис. 129 определяют по формуле

$$I_0 = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3 R_4 + R_3 R_4 R_1 + R_4 R_1 R_2} \quad (137)$$

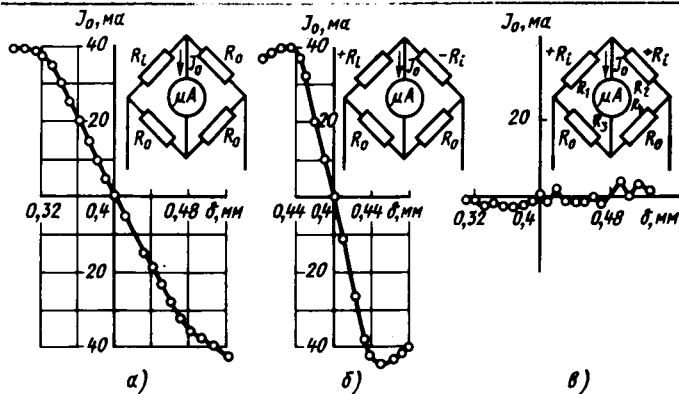


Рис. 129. Экспериментальные характеристики индуктивных преобразователей с ферритовым сердечником, включенных по мостовой схеме:

а — с одним активным преобразователем R_i ; б — с двумя активными преобразователями: — R_i , $+R_i$, в — с двумя активными, неправильно включенными преобразователями

При балансировке моста ток в измерительной диагонали равен нулю, т. е.

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (138)$$

Активные преобразователи, изменения сопротивлений которых имеют одинаковые знаки, должны включаться в противоположные плечи моста. Тогда при одинаковом сопротивлении всех плеч моста из формулы (137) получим явную зависимость тока $I_{0(i)}$ от числа активных преобразователей ($i=1, 2, 4$):

$$I_{0(1)} = U \frac{\Delta R}{4R^2}; \quad I_{0(2)} = U \frac{\Delta R}{2R^2};$$

$$I_{0(4)} = U \frac{\Delta R}{R^2}. \quad (139)$$

Следовательно, чувствительность мостовой схемы возрастает в 2 раза при двух активных преобразователях ($I_{0(2)}$) и в 4 раза при четырех ($I_{0(4)}$).

На рис. 129 построены экспериментальные характеристики различных мостовых схем с использованием индуктивных преобразователей по рис. 128, а. Начальный зазор $\delta_0 = 0,4$ мм. В соответствии с формулой (139) чувствительность мостовой схемы на рис. 129, б в 2 раза выше, чем схемы на рис. 129, а. Преобразователи в мостовой схеме на рис. 129, в включены неправильно, так как сопротивления одного знака $+R_i$ находятся в смежных, а не в противоположных плечах. Теоретически, из условия (138) баланса моста ток должен быть равен нулю: $+R_i R_0 = +R_i R_0$. Но в силу различных погрешностей небольшие колебания тока будут наблюдаться (см. график рис. 129, в), что ошибочно может быть принято за результаты исследования.

Устройство и основные характеристики преобразователей группы II. Пьезоэлектрический преобразователь. В нем использован прямой пьезоэффект. Преобразователь широко применяется для измерения сил, давлений, ускорений. На рис. 130, а представлена типовая конструкция акселерометра. При воздействии на корпус 1 механических колебаний с ускорением $\ddot{y}$ инерционная масса m с силой $F = m\ddot{y}$ деформирует пьезокерамические элементы 2. Возникающий электрический заряд q пропорционален силе F и, следовательно, ускорению.

Чувствительность преобразователя определяется как отношение напряжения u (заряда q) на обкладках пьезоэлемента к действующему на него колебательному ускорению:

$$S = \frac{u}{\ddot{y}}, \text{ или } S = \frac{q}{\ddot{y}}.$$

Для пьезоэлектрических преобразователей характерны малые габаритные размеры и масса (5—60 г), они работают в диапазоне от долей Гц до десятков кГц. Диапазон измеряемых ускорений $\ddot{y} = 0,01 \div 400\,000$ м/с², высокая чувствительность $S = 0,1 \div 100$ мВс²/м. При исследованиях преобразователь жестко прикрепляют к исследуемой детали; если рабочая частота $f_p > 2000$ Гц — преобразователи приваривают или приклеивают. Масса преобразователя не должна превышать 10% массы исследуемой детали. Диапазон рабочих частот выбирают в пределах 30—20% резонансной частоты. Необходимо учитывать наличие поперечной чувствительности, достигающей 2—20%.

Термоэлектрический преобразователь. Из-за нагрева и разнородности материалов в процессе резания металлов возникает термоэлектрический ток в цепи станок — инструмент — изделие — станок (рис. 130, б). Большая величина тока и малая инерционность позволяют исследовать процесс резания и регистрировать характер изменения сил резания, температуры, точно фиксировать время резания и про-

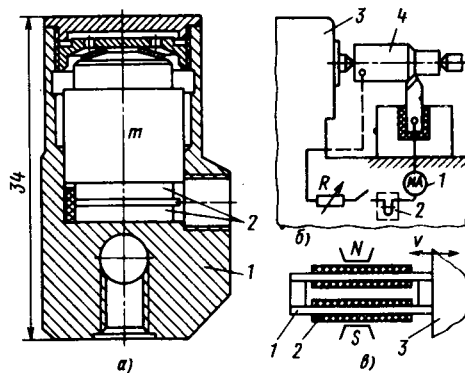


Рис. 130. Преобразователи группы электрического генератора:

а — пьезоэлектрический; б — термоэлектрический; в — индукционный

изводить другие измерения простыми средствами — стрелочным прибором 1 или осциллографом 2 без усилителя. Измерительную схему подключают к изолированному резцу и какой-либо корпусной детали 3. Для усиления сигнала рекомендуется производить подключение непосредственно к обрабатываемой детали 4.

Индукционный преобразователь. При движении электрического проводника длиной l со скоростью v относительно магнитного поля с индукцией B в проводнике наводится электродвижущая сила E при числе витков w :

$$E = Blwv.$$

Это явление электромагнитной индукции положено в основу работы индукционных преобразователей. Наводимая ЭДС пропорциональна измеряемой линейной v или угловой ω скоростям. На рис. 130, в показана схема индукционного преобразователя для измерения линейной скорости. Сердечник 1 вместе с катушкой 2 перемещается между полюсами магнита N и S . Наводимая ЭДС пропорциональна скорости подвижной части конструкции 3, скрепленной с сердечником.

В металлорежущих станках индукционные преобразователи широко используют для измерения скорости вращения (тахогенераторы постоянного и переменного тока). Для измерения длины или ускорения на выходе преобразователя включают соответственно интегрирующий или дифференцирующий контур.

Регистрирующие измерительные приборы. Для визуального наблюдения и записи быстроизменяющихся параметров ДС станков применяют светолучевые (магнитоэлектрические) и электроннолучевые (электронные) осциллографы.

Чувствительным элементом светолучевого осциллографа является вибратор 2 (рис. 131, а). Он представляет собой петлеобразный проводник 6 с наклеенным зеркальцем 1, расположенным между полюсами магнита. Возбуждаемый преобразователем ток протекает по проводнику и взаимодействует с магнитным полем. Зеркальце поворачивается, смещая отраженный от него световой луч. Часть светового потока направляется на фотопленку 3 для записи процессов, а часть через зеркальный барабан 4 — на экран 5 для визуального наблюдения.

Верхний предел регистрируемых осциллографом частот определяется собственной частотой вибраторов и составляет 500—7000 Гц.

Светолучевые осциллографы имеют много каналов (4—12 и более), что позволяет одновременно регистрировать несколько параметров. Их достоинство — возможность записи очень медленных и быстропротекающих процессов периодического и непериодического характера.

В лабораторных условиях применяют отечественные светолучевые осциллографы мод. Н-700, Н-102 и др. с записью на фотопленку или светочувствительную бумагу, в том числе 12-канальный осциллограф Н-115, приспособ-

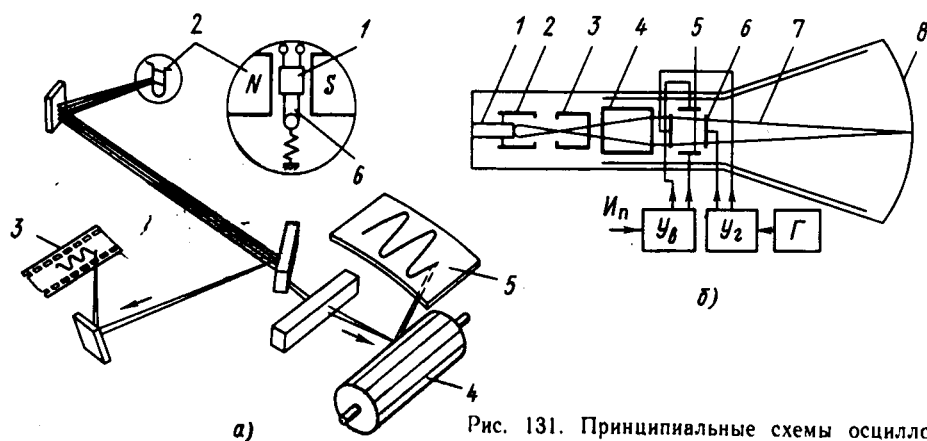


Рис. 131. Принципиальные схемы осциллографов: а — светолучевой; б — электронно-лучевой

собленный для записи на ультрафиолетовую бумагу УФ-67 с быстрым проявлением изображения на свету.

Принцип работы электронного осциллографа основан на взаимодействии электронного луча с электрическим (или магнитным) полем, образуемым напряжением (или током), подведенным от исследуемого объекта (рис. 131, б). Основной частью осциллографа является электронно-лучевая трубка ЭЛТ. Излучаемый катодом 1 поток электронов с помощью управляющего электрода 2 и анодов 3, 4 собирается в узкий луч 7, который оставляет на экране 8 яркое пятно. Изображение исследуемого процесса на экране осциллографа получается с помощью отклоняющих пластин. Напряжения от измерительного преобразователя I_n через усилитель U_v подается на пластины 5, смещающие луч в вертикальной плоскости. Другая пара пластин 6 получает напряжение от генератора развертки Γ через усилитель U_r и создает линейную развертку — пятно на экране равномерно перемещается слева направо. Чтобы получить неподвижное изображение на экране, генератор развертки синхронизируют с исследуемым напряжением.

Высокая чувствительность и безынерционность электронного луча позволяют исследовать как импульсные, так и периодические процессы с частотой в десятки миллионов Гц. Одновременно можно регистрировать только один или два (при двухлучевой трубке) параметра, что является существенным недостатком электронных осциллографов.

Усилитель. Усилители, работающие в комплекте со светолучевым осцил-

лографом, должны быть рассчитаны на малое сопротивление вибратора, одинаково линейно усиливать положительное и отрицательное напряжение, так как сигнал от тензопреобразователя может изменять свой знак. Частотная характеристика должна быть согласована с частотными свойствами вибратора осциллографа.

§ 2. Экспериментальные методы исследования виброустойчивости станков

Для оценки виброустойчивости станков в лабораторных и производственных условиях используют следующие методы исследований: по предельной стружке, по АФХЧ, по изменению коэффициента устойчивости и др. [26]. Первые два получили наибольшее распространение.

1. Исследование виброустойчивости станков по предельной стружке. Его выполняют в процессе резания. Создают реальные условия нагружения и работы подвижных соединений, исключают погрешность, связанную с линеаризацией системы.

Предельной стружкой считают максимальную ширину (глубину) среза, при которой работа осуществляется без вибраций. Предельную стружку определяют для каждого из фиксированных параметров резания или конструкции станка (скорости резания, подачи, вылета оправки и др.) при последовательном увеличении ширины (глубины) резания до момента интенсивного роста колебаний.

Схема измерения колебаний с использованием светолучевого осциллографа О приведена на рис. 132, а. Деталь

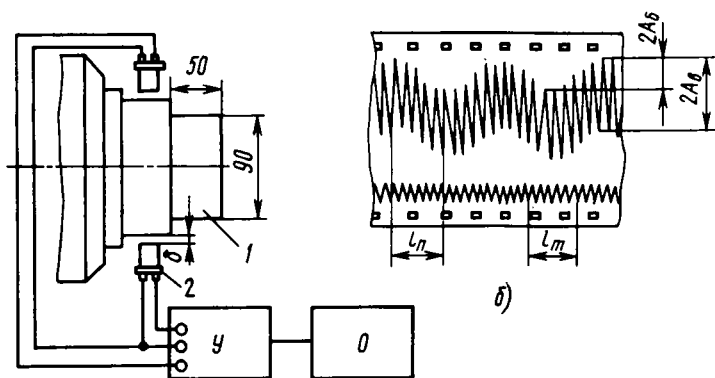


Рис. 132. Исследование колебаний шпинделя:
а — измерительная схема; б — осциллограмма записи колебаний шпинделя

1 обрабатывают по цилиндрической поверхности проходным или широким резцом. Колебания регистрируют индуктивными преобразователями 2, установленными с зазором $\delta = 0,4$ мм симметрично по отношению к заготовке (шпинделю). Оба преобразователя являются активными, их включают в полумост, вторая часть которого встроена в усилитель У.

На осциллограмме (рис. 132, б) приведена запись колебаний заготовки с амплитудой A_b , на фоне которых четко просматривается биение шпинделя с амплитудой A_δ и более низкой частотой. Вторая кривая представляет собой запись переменного тока частотой 50 Гц и используется как отметчик времени.

Частоту колебаний заготовки определяют по отрезкам l_n , l_m , которые содержат соответственно n и m периодов колебаний:

$$f = \frac{50 l_m n}{l_n m}.$$

Амплитуду колебаний A_b определяют при тарировке изменением зазора δ .

Для определения предельной ширины резания $b_{пр}$, например, в функции скорости резания v , при каждом фиксированном значении v_i ширину резания b увеличивают до тех пор, пока измеренная амплитуда колебаний A_b не достигнет допустимого значения A_d .

Условию $\frac{A_b}{A_d} = 1$ соответствует предельная ширина резания:

для v_1 задают ряд $b_1, b_2, \dots, b_{1пр};$

для v_2 задают ряд $b_1, b_2, \dots, b_{2пр};$

для v_n задают ряд $b_1, b_2, \dots, b_{nпр}.$

По точкам $v_i - b_{iпр}$ строят границу устойчивости (рис. 133).

Периодическое возникновение и исчезновение колебаний свидетельствует о кинематических или конструктивных недостатках в станке, в частности о неудовлетворительном контакте конуса оправки.

Одним из методов поиска причин низкой виброустойчивости станков является определение форм колебаний, характеризующих пространственную деформацию станка. Под формой колебаний станка понимают совокупность отношений перемещений колеблющихся

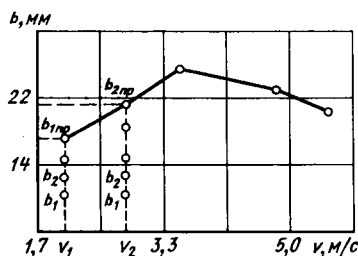


Рис. 133. Построение границы устойчивости по предельной ширине резания $b_{пр}$ в функции скорости v

точек к какой-либо отдельной точке упругой системы, полученных в определенный момент времени. Для снятия формы колебаний выбирают опорную точку, с которой сравнивают колебания всех остальных.

Возбуждение колебаний осуществляется резанием в наиболее виброопасном режиме, измерение — индуктивными или проволоочными преобразователями. Относительные амплитуды колебаний наносят на контуры станка. Дальнейшему исследованию подлежит тот элемент станка, где отклонения наибольшие.

2. Исследование виброустойчивости станков по АФЧХ ДС. Наиболее точно АФЧХ определяют экспериментально. В ЭНИМСе разработаны методика и средства измерения частотных характеристик ЭУС и ПР [26], которые позволяют проследивать влияние отдельных конструктивных и технологических параметров на устойчивость станка.

Характеристика эквивалентной упругой системы должна определяться на работающем станке или на холостом ходу. В последнем случае сохраняется подвижность соединений и допускаемая погрешность невелика. Но в обоих случаях возникают трудности в создании внешней нагрузки и измерении относительных смещений между подвижными звеньями станка: инструментом и заготовкой.

На практике часто характеристики $W_{эус}$ определяют на неработающем станке. Погрешность будет тем меньше, чем меньше влияние подвижных соединений упругой системы во всем или каком-либо частотном диапазоне. При значительном влиянии подвижных соединений наибольшие отклонения

от действительной характеристики будут по амплитуде и фазе колебаний и наименьшие по собственной частоте [26].

При снятии статической характеристики $K_{\text{ЭУС}}$ нагрузка во времени постоянна. Методика и приборы те же, что и при экспериментальном определении жесткости станков. Если нагрузку между конечными звеньями станка P_0 , несущими деталь и инструмент, направить по равнодействующей сил резания, а отжатие y_0 измерять по нормали к обработанной поверхности, то после линеаризации статическую характеристику определяют из отношения

$$K_{\text{ЭУС}} = \frac{y_0}{P_0}.$$

С помощью двухкоординатного самописца ПДС-021 характеристику можно строить автоматически.

При определении динамической характеристики ЭУС на несущие конструкции воздействует переменная во времени нагрузка — входная координата. В качестве выходной координаты принимают относительные упругие смещения тех же конструкций. Направление нагружающей силы и измеряемых упругих смещений сохраняются такими же, как и при снятии статической характеристики.

Блок-схема установки для снятия АФЧХ ЭУС металлорежущих станков показана на рис. 134. Силовое воздействие на упругую систему станка осуществляют по синусоидальному закону электромагнитным вибратором B и регистрируют преобразователем силы

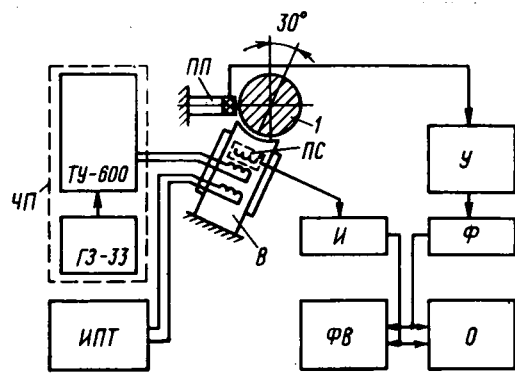


Рис. 134. Блок-схема установки для определения АФЧХ ЭУС станков

ПС. Относительные смещения несущих конструкций регистрируют преобразователем перемещения ПП.

Вибратор и преобразователь перемещения, в соответствии со схемой определения статической характеристики, жестко крепят на суппорте (стол) станка, а оправку I — в шпинделе.

Вибратор имеет две катушки: постоянного и переменного тока. Катушка постоянного тока питается от источника ИПТ и создает постоянную составляющую нагрузки, величина которой зависит от предварительного натяга в системе и силы резания, характерной для данного типа станка. Катушка переменного тока питается от частотного преобразователя ЧП и создает переменную составляющую нагрузки для возбуждения вынужденных колебаний. Амплитудное значение переменной нагрузки должно быть минимальным и определяется чувствительностью аппаратуры.

Частотный преобразователь должен обеспечивать диапазон частот 20—600 Гц для легких и средних станков, синусоидальную форму напряжения и дискретность регулирования частоты 0,5 Гц. На схеме рис. 134 частоту регулируют звуковым генератором ГЗ-33, сигнал от которого усиливается трансляционным усилителем ТУ-600. От преобразователей ПП и ПС сигнал через усилитель $У$, фильтр $Ф$ и интегратор $И$ подается на фазочувствительный вольтметр $ФВ$ и электронный осциллограф $О$. Показания индикаторов вольтметра соответствуют координатам $Re_{\text{ЭУС}}$ и $Im_{\text{ЭУС}}$ АФЧХ исследуемого станка.

Перемещения и силы измеряют индуктивными и тензометрическими преобразователями. Силу можно измерять через измерительную обмотку вибратора. Наблюдение и контроль за формой сигналов осуществляют по осциллографу.

При снятии АФЧХ станка применяют бесконтактный или контактный вибратор: первый при вращающемся шпинделе, когда сохраняется подвижность соединений в несущих конструкциях, второй на неработающем станке.

Общий вид бесконтактного вибратора I , установленного на столе координатно-расточного станка мод. КР-450, показан на рис. 135, а.

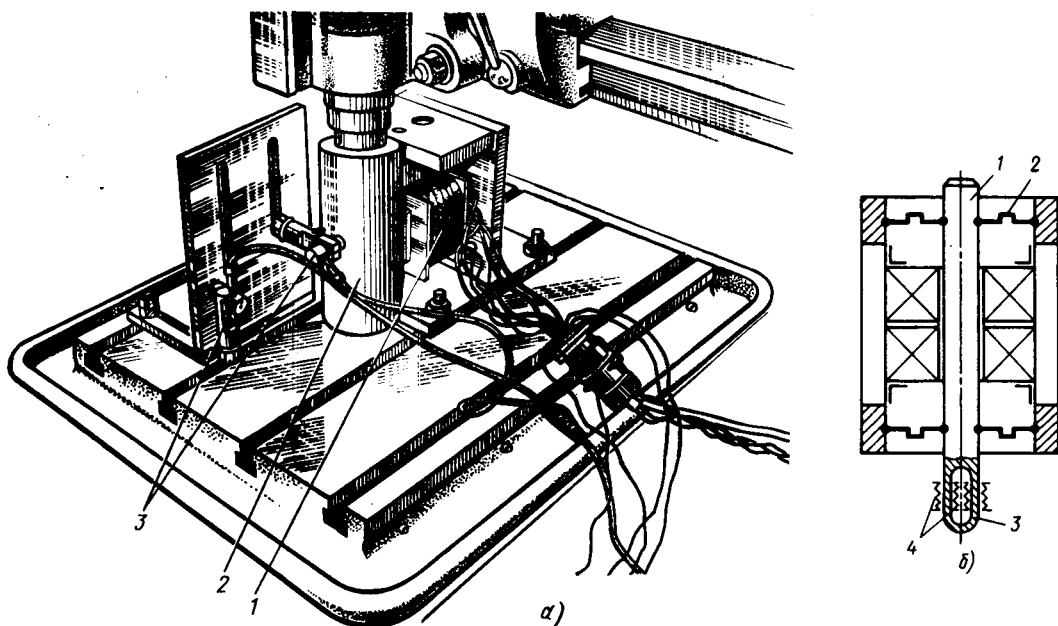


Рис. 135. Вибраторы для нагружения станка периодической возмущающей силой:
а — бесконтактный; б — контактный.

Между оправкой 2 и сердечником вибратора существует начальный зазор 0,5—1,5 мм. Переменную силу регистрируют через измерительную обмотку; упругое смещение — индуктивным преобразователем 3.

Принципиальная схема одного из контактных вибраторов приведена на рис. 135, б. Якорь 1 жестко скреплен с подвесками 2, которые выполняют роль упругих опор. На одном конце якоря устанавливают тензометрический наконечник 3, через который производят нагружение и одновременно регистрацию действующих на станок сил с помощью преобразователей 4. В средней части якоря свободно перемещается внутри катушек переменного и постоянного тока. При подаче напряжения на катушки якорь выталкивается и нагружает элементы станка.

Разработанные электромагнитные вибраторы данного типа развивают переменную силу 50—150 Н в диапазоне частот от 20 до 550 Гц и постоянную силу 75—1000 Н, обеспечивают простоту управления по амплитуде силы и частоте.

Если снятие АФЧХ не автоматизировано, то координаты Re и Im регистрируют по стрелочным приборам фазочувствительного вольтметра и на-

носят в масштабе на комплексной плоскости. Каждой частоте возмущающего воздействия ω соответствует одна точка. Все точки исследуемого диапазона частот соединяют и получается экспериментальная АФЧХ (см. рис. 123). Переменная построенную характеристику ЭУС со статической или динамической характеристикой резания, определяют отрезок на вещественной оси $Re_{раз}^0$ и оценивают устойчивость станка.

Наряду с изложенным представляет интерес метод определения АФЧХ непосредственно в процессе резания [38]. При необходимости частоту возмущения регулируют изменением числа лезвий, выступов (пазов) или частотой вращения шпинделя.

Возникающие в процессе резания колебания рассматривают как случайные. Измеряя силы резания, отжатия несущих элементов и смещения по фазе, после статистической обработки осциллограмм строят АФЧХ (АФЧ, ФЧХ).

Изложенное представление о динамике станков и методах исследования устойчивости выполнено в предположении детерминированных параметров ДС. Это вызвано скорее простотой изложения, чем отражением объективных условий. Известно, что в ДС параметры

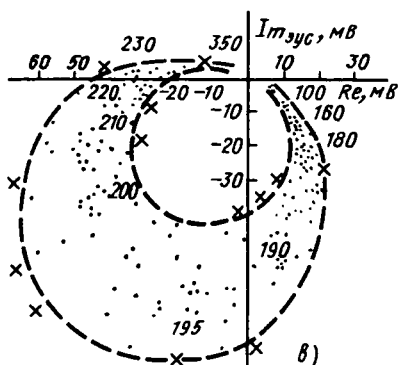
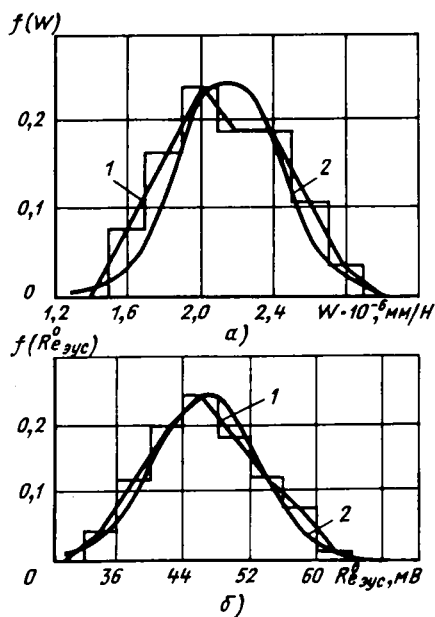


Рис. 136. Рассеяние основных параметров ДС станка:

а — рассеяние податливости шпиндельных узлов токарно-винторезного станка мод. 16К20; б — рассеяние отрезков $Re^0_{зус}$ станка мод. КР-450 при частоте вращения шпинделя $n=90$ об/мин; в — поле рассеяния АФЧХ УС станка мод. КР-450

УС, процессов резания, трения и др. не могут считаться одинаковыми даже для станков одной серии. Экспериментальные исследования показывают, что жесткость, основная частота колебаний и логарифмический декремент колебаний часто распределяются по нормальному закону.

На рис. 136, а показана экспериментальная 1 и аппроксимированная 2 по нормальному закону плотность вероятности $f(W)$ распределения податливости W станков мод. КР-450. Для тех же станков на рис. 136, б показана экспериментальная 1 и аппроксимированная 2 по нормальному закону плотность вероятности $f(Re^0_{зус})$ распределения интегральной характеристики ЭУС — отрезков $Re^0_{зус}$ при частоте вращения 90 об/мин. Из-за рассеяния исходных параметров ДС этих станков вместо детерминированной характери-

стики получается область существования АФЧХ, заключенная между кривыми 1 и 2 (рис 136, в). Поэтому для каждой из исследованных частот $\omega = 100 \div 350 \text{ с}^{-1}$ существует множество точек.

Очевидно, что решение задач динамики может быть осуществлено только с привлечением теории вероятности. Граница устойчивости превращается в полосу устойчивости. Для этих условий введен вероятностный критерий оценки устойчивости станков [42]:

$$Re^0_{раз} < |1 - \beta v_k|,$$

где βv_k характеризует рассеяние параметров ДС станков.

Применение вероятностных методов расчета является одним из основных направлений исследования динамической системы станков.

§ 1. Основные понятия и показатели

Основные понятия и показатели надежности станка связаны с оценкой его работоспособности, в первую очередь исходя из обеспечения точности обработки. Определение работоспособности и основные причины, изменяющие начальные показатели станка, были рассмотрены выше (см. гл. 8 и рис. 57). Понятие надежности может быть отнесено как к станку в целом, так и к отдельным его элементам. Объект рассмотрения будем называть изделием.

Надежность — это свойство изделия сохранять свою работоспособность в течение требуемого промежутка времени. Надежность изделия — это обобщенное свойство, которое включает в себя понятие безотказности и долговечности. Прежде чем дать их определение, рассмотрим, как оценивать время работы изделия. Здесь возникают два основных случая. Первый — когда время оценивают календарной продолжительностью работы изделия. Это характерно для таких причин нарушения работоспособности изделия, как коррозия, действие внешних тепловых факторов и др. Время работы до отказа $t = T$ в этом случае называется сроком службы до отказа (t — текущее время; T — данный промежуток времени).

Однако для большинства машин и их механизмов основное значение для оценки потери работоспособности имеет не календарное время, а продолжительность работы изделия. Время работы изделия до отказа называют в этом случае наработкой до отказа. Длительность работы изделия в силу тех или иных причин (необходимость ремонта, возрастание опасности дальнейшей экс-

плуатации) может быть регламентирована. Нарботка, или срок службы до предельного регламентированного состояния, называется соответственно ресурсом T_r или сроком службы $T_{сл}$. Следует отметить, что время работы изделия до отказа T — случайная величина, в то время как ресурс или срок службы — неслучайные величины. ГОСТ 13377—75 предусматривает применение таких показателей, как назначенный, гамма-процентный и средний ресурсы (или сроки службы), которые являются неслучайными величинами. Пересчет календарных часов в часы работы изделия не представляет трудностей, если известен коэффициент загрузки станка и доля участия данного механизма в цикле работы. Надежность изделия можно рассматривать в течение различных промежутков времени и при допустимых или недопустимых перерывах для ремонта и технического обслуживания.

Безотказность — свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность — свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Таким образом, надежность станка определяется его безотказностью и долговечностью. Безотказность характеризует его самостоятельную непрерывную работу без каких-либо вмешательств для поддержания работоспособности. Долговечность станка, наоборот, характеризует его работу за весь период эксплуатации и учитывает, что длительная работа невозможна без ремонтных и профилактических мероприятий,

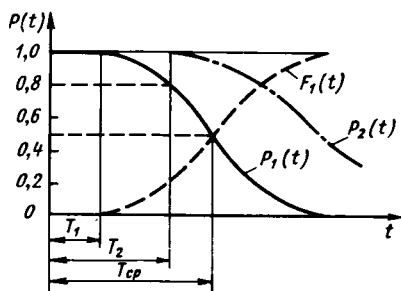


Рис. 137. Изменение вероятности безотказной работы изделия во времени

восстанавливающих работоспособность, утрачиваемую в процессе эксплуатации.

Основные причины, определяющие надежность изделия, связаны со случайными явлениями, для описания которых применяют математический аппарат теории вероятностей. Например, отказ — это случайное событие, срок службы (наработка) до отказа — случайная величина и процесс, приводящий к потере работоспособности (например, износ), — случайная функция. Поэтому и показатели, применяемые для оценки надежности изделия, имеют вероятностную природу.

Основной показатель безотказности изделия — вероятность безотказной работы $P(t)$ (коэффициент надежности), вероятность того, что в заданном интервале времени $t=T$ (или в пределах заданной наработки) не возникает отказа изделия. Значение $P(t)$ может находиться в пределах $0 \leq P(t) \leq 1$. Значение $P(t)$ характеризует степень опасности отказа, и поэтому чем выше его значение, тем более надежно будет работать изделие.

Следует иметь в виду, что использование $P(t)$ без указания периода времени $t=T$, в течение которого рассматривают работу изделия, не имеет смысла. На рис. 137 приведен пример кривой $P(t)$ как функции времени. Штриховой линией показана кривая вероятности отказов $F_1(t) = 1 - P_1(t)$ симметричная по отношению к $P_1(t)$. Обе кривые пересекаются в точке, соответствующей среднему (медианному) сроку службы (наработке) изделия $t=T_{cp}$. Для данного изделия при его работе в течение $t=T_1$, безотказность работы весьма высокая, так как $P_1(t) \approx 1$, а при $t=T_2$ $P_1(t) = 0,8$.

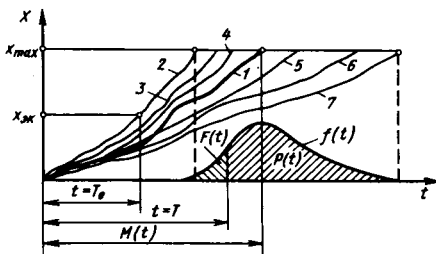


Рис. 138. Схема изменения выходного параметра детали во времени для выбора ее срока службы

Каждому изделию в зависимости от его работоспособности соответствует своя кривая $P(t)$. Кривая $P_2(t)$ соответствует изделию, обладающему большей надежностью, область безотказной работы которого значительно шире. Например, при $t=T_2$ вероятность безотказной работы $P_2(t) = 1$.

Значение T связано функциональной зависимостью с $P(t)$:

$$P(t) = \int_{t=T}^{\infty} f(t) dt, \quad (140)$$

где $f(t)$ — плотность вероятности для срока службы (наработки) изделия.

Так, на рис. 138 показано случайное изменение выходного параметра x изделия во времени (кривые 1 — 7; кривая 1 — изменение выходного параметра до максимально допустимого значения x_{max} при времени эксплуатации, равном математическому ожиданию $M(t)$ случайной величины T). Выбирая значения T по формуле (140), можно для этого изделия обеспечить требуемую $P(t)$ по выходному параметру x . При этом могут быть два способа выбора показателей.

1. При высоких требованиях к надежности изделия задают допустимые значения $P(t) = \gamma\%$ и определяют время работы изделия $t=T_{\gamma}$, соответствующее данной регламентированной вероятности безотказной работы. Значение T_{γ} называется гамма-процентным ресурсом, и по его величине судят о большей или меньшей безотказности изделий.

2. При обычных требованиях к надежности (отказ не приводит к тяжелым последствиям) можно задавать ресурс изделия $t=T_p$ (или срок службы T_{cl}), например из условия необходимости проведения планового ре-

монта станка. В этом случае о безотказности изделия судят непосредственно по значению $P(t)$. Если в течение данного периода времени отказы возникают часто (например, легко устранимые отказы, связанные с застреванием детали в транспортном лотке), т. е. $P(t) \rightarrow 0$, то характеристикой безотказной работы может служить среднее число отказов $\Omega(t)$ в данном интервале времени $0-t$ (так называемая ведущая функция) или параметр потока отказов

$$\omega = \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{T_{\text{ср}}}, \quad (141)$$

где $T_{\text{ср}}$ — наработка на отказ, т. е. средняя продолжительность работы изделия между отказами. Параметр потока отказов — это среднее число отказов изделия в единицу времени. Если же за рассматриваемый промежуток времени отказы недопустимы, т. е. $P(t) \rightarrow 1$, то для оценки безотказности можно пользоваться понятием запаса K_n надежности по данному параметру x . Пусть известно, что за данный период времени $t = T_0$ параметр изделия x может принимать различные значения (так как является случайной величиной), но его экстремальная для данных условий величина будет равна $x_{\text{эк}}$ (рис. 138). Это значение зависит, например, от скорости износа сопряжения для наиболее неблагоприятных условий эксплуатации (максимальные режимы, отсутствие смазки и т. л.). Если значение параметра, при котором наступит отказ изделия, будет x_{max} , то запас надежности

$$K_n = \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{эк}}} > 1. \quad (142)$$

Запас надежности можно подсчитывать так же, как отношение x_{max} к такому значению параметра x_γ , при котором с вероятностью γ параметр не выйдет за данные пределы, т. е.

$$K_n = \frac{x_{\text{max}}}{x_\gamma}. \quad (143)$$

Показатели долговечности оценивают потерю работоспособности изделия за весь период его эксплуатации. Следует различать показатели для

долговечности элемента изделия и для станка в целом. Основной показатель долговечности элемента изделия — его срок службы (наработка) до отказа T .

Значение T определяется предельно допустимой величиной выходного параметра $x = x_{\text{max}}$ и некоторым случайным процессом потери работоспособности $x(t)$, например износом изделия, его коррозией и т. п. Поэтому долговечность и безотказность элемента изделия характеризуются одними и теми же показателями — T и соответствующим ему $P(t)$.

Однако совершенно иная картина наблюдается для сложного изделия или станка, которые насчитывают тысячи элементов со своими сроками службы. Поэтому для оценки долговечности сложного изделия применяют две категории показателей. Во-первых, это показатели, характеризующие выход за допустимые пределы основных технических характеристик (выходных параметров) изделия в целом. Основным показателем станка является точность обработки, которая должна сохраняться в течение заданного периода времени.

Во-вторых, показатели долговечности всего станка должны характеризовать его способность выполнять свои функции с минимальными затратами на замену износившихся деталей, подналадку, ремонт и обслуживание. Чем меньше суммарные затраты времени и средств, идущие на восстановление работоспособности станка в течение всего периода эксплуатации, тем выше его долговечность.

Показателем, определяющим долговечность станка, может служить коэффициент технического использования

$$K_{\text{т. и}} = \frac{T_0}{T_0 + \Sigma T_{\text{рем } i}}, \quad (144)$$

где T_0 — время работы станка за некоторый период эксплуатации; $\Sigma T_{\text{рем } i}$ — суммарное время простоев станка из-за его ремонта и технического обслуживания.

Потребность в ремонте и техническом обслуживании зависит от технического уровня станка. На время его простоев влияет система организации ремонта (см. гл. 13). Для каждого типа станка время ремонта и организационные методы его осуществления регламентированы системой ППР.

Коэффициент технического использования — безразмерная величина ($0 \leq K_{т.и} \leq 1$), и чем выше его значение, тем долговечнее машина. Он равен вероятности того, что в данный, произвольно взятый момент времени станок работает, а не ремонтируется. Оценку долговечности станка целесообразно относить ко всему периоду его эксплуатации или минимум до капитального ремонта. В этом случае $K_{т.и}$ превращается в коэффициент долговечности K_d .

Если же при подсчете времени простоя не учитывают запланированные ремонты и техническое обслуживание, а берут лишь время, идущее на ликвидацию внезапно возникающих отказов, то коэффициент технического использования превращается в коэффициент готовности K_g .

Ремонтопригодность — это свойство изделия, которое заключается в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и повреждений путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Таким образом, ремонтопригодность, которая определяет затраты времени $\Sigma T_{рем}$ [см. формулу (144)], — составная часть долговечности. Для определения коэффициента долговечности K_d необходимо установить его зависимость от сроков службы элементов изделия. Время простоя из-за ремонта данной i -й детали или элемента станка

$$T_{рем i} = \frac{T_0}{T_i} \tau_i,$$

где T_i — срок службы (наработка) i -й детали станка; τ_i — время (трудоемкость) ремонта i -й детали, включая разработку, сборку и выверку.

Отношение T_0/T_i показывает, сколько раз в течение периода, равного T_0 , ремонтировали данную деталь. Для определения K_d необходимо брать период времени, больший, чем срок службы T_i любой детали станка.

Подставляя значение $T_{рем i}$ в формулу (144), получим коэффициент долговечности, выраженный через сроки службы и трудоемкость ремонта деталей машины:

$$K_d = \frac{1}{1 + \Sigma \frac{\tau_i}{T_i}}. \quad (145)$$

При периодических ремонтах, когда одновременно ремонтируется группа

деталей, под T_i понимают время до очередного ремонта и под τ_i — его трудоемкость. Из формулы (145) следует, что основной метод повышения долговечности машины — повышение срока службы ее деталей и сокращение времени, затрачиваемого на ремонт.

Отказы, возникающие в станке, весьма разнообразны. В первую очередь можно указать следующие категории отказов.

Постепенные (износные) отказы возникают в результате протекания того или иного процесса старения, ухудшающего начальные параметры изделия. Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени $t_1 - t_2$ зависит от длительности предыдущей работы изделия. Чем дольше работало изделие, тем выше вероятность возникновения отказа, т. е. $F(t_2) > F(t_1)$, если $t_2 > t_1$. К этому виду относится большинство отказов станка. Они связаны с процессами износа, коррозии, усталости, коробления, ползучести и другими процессами разрушения и деформации материалов.

Внезапные отказы — это те, причиной которых являются процессы, возникающие в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности изделия к их восприятию. Основным признаком внезапного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени $t_1 - t_2$ не зависит от длительности предыдущей работы изделия t . Деление на постепенные и внезапные отказы определяется природой их возникновения, а не тем, установлена или нет причина отказа. Внезапность отказа при эксплуатации машины в силу скрытости процесса разрушения еще не означает, что отказ относится к категории внезапных. Критерием здесь будет зависимость $F(t)$ от времени предыдущей работы станка.

Последствия отказов весьма разнообразны, но в первую очередь их можно разделить на параметрические и отказы функционирования.

Отказ функционирования приводит к тому, что станок или его механизм не может выполнять своих функций.

Часто отказ функционирования связан с поломками или заклиниванием отдельных элементов изделия.

Параметрический отказ приводит к выходу параметров (характеристик) изделия за допустимые пределы (например, нарушение точности обработки на станке). Для станков наиболее характерны параметрические отказы, это связано с высокими требованиями к их выходным параметрам. Продолжение использования станка, имеющего параметрический отказ, может привести к выпуску некачественной продукции.

§ 2. Модели параметрических отказов

Разработка моделей формирования параметрических отказов является основой для расчета и прогнозирования надежности различных изделий, в том числе станка, его механизмов. Закон распределения времени работы изделия до отказа, выраженный в дифференциальной форме в виде плотности вероятности $f(t)$ или в интегральной форме в виде функции распределения $F(t)$, является полной характеристикой надежности изделия или его элемента. Он позволяет определить (см. рис. 138) вероятность безотказной работы $P(t) = 1 - F(t)$, средний срок службы или среднюю наработку до отказа (математическое ожидание):

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} f(t) t dt = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (146)$$

дисперсию

$$D = \int_0^{\infty} (T_{cp} - t)^2 f(t) dt \quad (147)$$

или среднее квадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{D}$ и другие численные характеристики — моменты более высоких порядков, квантили.

Основная задача теории надежности состоит в выявлении и математическом описании такого закона распределения $f(t)$, который отражал бы с высокой степенью достоверности объективную действительность. Наиболее простой и широко распространенный путь для решения этой задачи заключается в непосредственном выборе закона распределения, который, по мнению ис-

следователя, отражает действительную картину.

Часто применяют нормальный закон распределения, закон Вейбула, логарифмически нормальный, экспоненциальный и др. Однако непосредственный подбор закона распределения по его внешним признакам, даже при наличии статистических данных об отказах (которых, как правило, недостаточно или вообще нет), не может быть принят в качестве основного метода для решения задач надежности.

Основа прогноза — рассмотрение физической модели формирования отказов с учетом стохастической природы протекающих процессов. Возникновение отказа — конечный результат ряда последовательных этапов, которые независимо от вида отказа имеют общие черты.

Рассмотрим блок-схему возникновения отказа (рис. 139), опираясь на общее представление о протекании в станке различных вредных процессов (процессов старения), которые при определенных условиях могут привести к потере им работоспособности (см. гл. 8).

При эксплуатации станка на него действуют все виды энергии, но для возникновения вредных процессов необходим определенный их уровень. Если этот уровень не превышен, то предпосылок для возникновения отказа не будет. Под действием различных видов энергии могут появиться и развиваться во времени такие процессы, как деформация, изнашивание, коррозия, изменение физических свойств и др. Эти процессы могут привести к повреждению изделия. Под повреждением понимают отклонение контролируемых свойств от начальных, полученных при изготовлении изделия. Следует иметь в виду, что зависимость между степенью повреждения (например, износом U) и выходным параметром x , как правило, неслучайная или ее стохастическая природа проявляется весьма слабо.

Полученное повреждение может влиять или не влиять на выходные параметры изделия, которые являются показателями его работоспособности (например, показатели точности станка). Если данное повреждение не влияет на выходной параметр изделия,

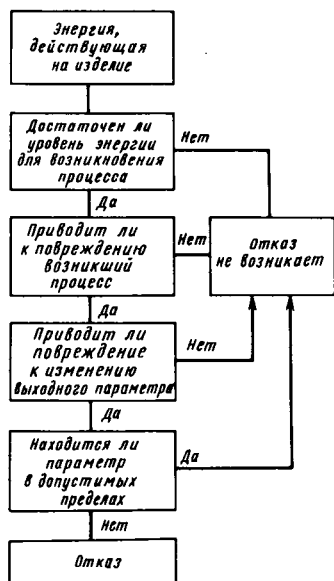


Рис. 139. Блок-схема возникновения отказов

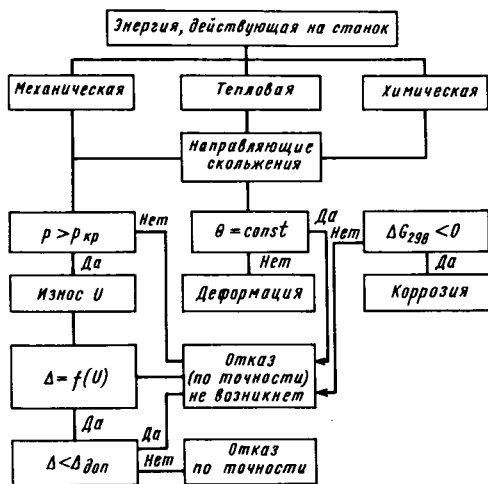


Рис. 140. Блок-схема отказа направляющих станка

то отказ не возникает. Например, равномерный износ направляющих станка не приведет к потере им точности, так как прямолинейность траектории движения инструмента сохранится. Если же повреждение приводит к изменению выходного параметра изделия, то отказ возникает лишь тогда, когда этот параметр выйдет за допустимые пределы, установленные техническими условиями на изделие.

В качестве примера разработки блок-схемы возникновения отказа на рис. 140 показан упрощенный вариант схемы для направляющих металлорежущих станков.

Для возникновения процесса изнашивания, если придерживаться усталостной теории износа, необходимо, чтобы давление в направляющих p не превосходило некоторого критического значения: $p < p_{кр}$. Условие для отсутствия тепловых деформаций заключается в обеспечении постоянства температуры: $\theta = \text{const}$. Поэтому прецизионные станки, как правило, работают в термоконстантных помещениях. Для станков нормальной точности доля тепловых деформаций в балансе точности обычно невелика.

Для оценки возможности протекания коррозии, которая для направляющих

связана как с атмосферными влияниями, так и с действием охлаждающей жидкости, необходимо на основании законов химической термодинамики определить термодинамическую устойчивость металла в данной среде. Для этого наиболее часто используется изобарно-изотермический потенциал (функция Гиббса). Коррозионный процесс возможен, если стандартная величина изменения этого потенциала $\Delta G_{298} < 0$.

Для направляющих станков основной причиной потери работоспособности является износ. Повреждение поверхности в результате износа приводит к искажению начальной формы направляющих, что влияет на точность обработки. Поэтому выходной параметр станка — погрешность обработки Δ — функционально связан с износом направляющих U , т. е. $\Delta = f(U)$. Однако если Δ не превосходит допустимого (по требованиям точности к станку) значения $\Delta_{доп}$, то отказ не возникает. Перечисленные этапы блок-схемы изображены на рис. 140.

Расчет и прогнозирование параметрической надежности станков касается обычно последних этапов блок-схемы, когда решается вопрос о нахождении параметра в допустимых пределах и

трическая интерпретация этой формулы — площадь под кривой $f(x, t)$ при $T \leq t < \infty$.

Следует отметить, что распределение

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \quad (149)$$

не подчиняется нормальному закону.

Формула (148) получена из условия оценки вероятности выхода параметра x за допустимые пределы $x_{\max}$, т. е. Вер ($x \leq x_{\max}$). При этом считают, что рассеяние параметра x подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием $M(x) = a_{cp} + \gamma_{cp}t$ и средним квадратическим отклонением $\sigma = \sqrt{\sigma_a^2 + (\sigma_x t)^2}$ (см. рис. 142).

§ 3. Прогнозирование параметрической надежности

Одной из основных причин потери станком работоспособности является износ (см. гл. 19). Поэтому прогнозирование надежности должно проводиться в первую очередь с учетом износа его механизмов. При этом следует учитывать разнообразие возможных условий эксплуатации, дисперсию свойств материалов изделий и другие факторы, приводящие к необходимости построения вероятностной модели процесса потери станком работоспособности.

Прогнозирование может состоять из следующих этапов.

1. Для каждого из выходных параметров изделия, $x_1, x_2, \dots, x_n$ устанавливают предельное состояние $x_{\max}$ и оценивают рассеяние σ_a относительно среднего значения a_0 . При наличии опытного образца эти данные могут быть получены на основе кратковременных испытаний.

2. Для оценки скорости изменения выходного параметра γ_x надо установить ее аналитическую зависимость от скоростей изнашивания отдельных элементов машины:

$$\gamma_x = f(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n). \quad (150)$$

Эта зависимость часто линейная и может быть получена на основании анализа схемы износа данного узла.

3. Зависимость (150) — функция случайных аргументов; так как скорость изнашивания γ_i зависит от мно-

гих факторов (нагрузки, скорости скольжения, смазки, качества материалов и др.) и имеет дисперсию. Информация о скорости изнашивания может быть получена на основании теоретических расчетов, испытания образцов или узлов трения на износ, статистических данных по эксплуатации аналогичных узлов трения. В большинстве случаев эти распределения случайных аргументов подчиняются нормальному закону.

4. Прогнозирование надежности для принятых выше условий может осуществляться по формуле (148). Эта формула позволяет либо по заданной длительности межремонтного периода $t = T$ оценивать вероятность безотказной работы изделий, либо при регламентированном значении $P(t)$ оценивать его ресурс по данному параметру ($t = T_\gamma$ гамма-процентный ресурс).

Прогнозирование надежности наиболее целесообразно осуществлять с применением ЭВМ, разработав алгоритм, который описывает перечисленные этапы.

Рассмотренная на рис. 142 модель отказа — формализованное описание процесса потери машиной работоспособности. Она устанавливает аналитические зависимости между входными и выходными параметрами изделия. Статистическая природа этих закономерностей проявляется в том, что аргументы полученных функций случайные и зависят от большого числа факторов. Поэтому, чтобы представить поведение системы, необходимо определить вероятность того или иного ее состояния.

Для прогнозирования поведения сложной системы можно применять метод статистического моделирования (статистических испытаний), который получил название метода Монте-Карло. Основная идея этого метода заключается в многократном расчете параметров по некоторой формализованной схеме, являющейся математическим описанием данного процесса (в нашем случае — процесса потери работоспособности). При этом для случайных параметров, входящих в формулы, перебирают наиболее вероятные их значения в соответствии с законами распределения.

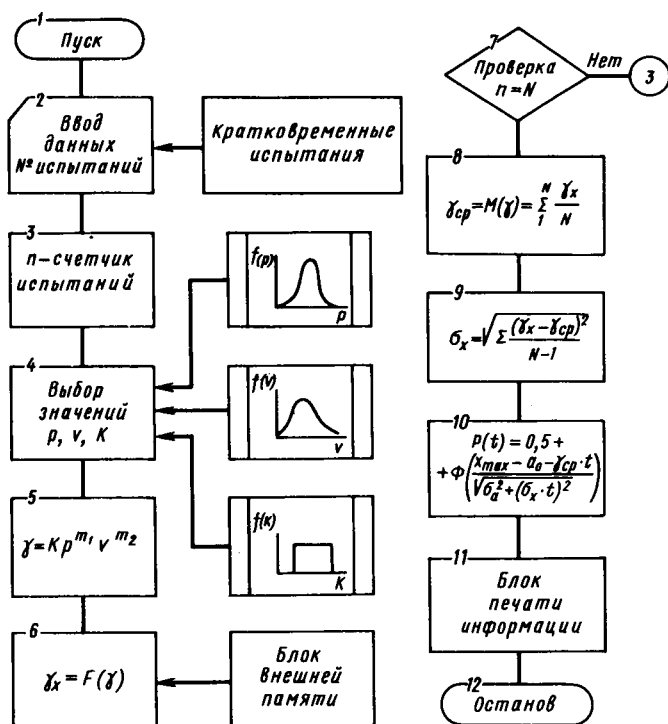


Рис. 143. Блок-схема для расчета на ЭВМ параметров надежности по методу Монте-Карло

Таким образом, каждое статистическое испытание заключается в выявлении одной из реализаций случайного процесса, так как, подставляя хотя и случайным образом выбранные, но зафиксированные аргументы, получаем детерминированную зависимость, которая описывает данный процесс при принятых условиях. Многократно повторяя испытания по данной схеме (что практически возможно в сложных случаях лишь с применением ЭВМ), получим большое число реализаций случайного процесса, которые позволят оценить ход этого процесса и его основные параметры.

Рассмотрим упрощенную блок-схему алгоритма для расчета на ЭВМ надежности изделия, потеря работоспособности которого может быть описана схемой на рис. 142.

Пусть изменение выходного параметра x зависит от износа одного из элементов изделия, т. е. $x = F(U)$, где F — функция, зависящая от конструктивной схемы изделия. Примем, что износ связан с давлением p и скоростью скольжения трущейся пары v степенной зависимостью: $U = K p^{m_1} v^{m_2} t$, где m_1, m_2 — известные

коэффициенты (например, из испытания материалов пары). Коэффициент K оценивает условия работы сопряжения (смазку, засоренность поверхностей).

Данное изделие может попасть в различные условия эксплуатации и работать при разных режимах. Для того чтобы предсказать ход процесса потери изделием работоспособности, надо знать вероятностную характеристику тех условий, в которых оно будет эксплуатироваться. Такими характеристиками могут быть законы распределения нагрузок $f(P)$, скоростей $f(v)$ и условий эксплуатации $f(K)$.

Алгоритм для оценки надежности методом Монте-Карло (рис. 143) состоит из программы одного случайного испытания, по которой определяют одно конкретное значение скорости изменения параметра γ_x . Данное испытание повторяют N раз (N должно быть достаточно большим для получения достоверных статистических данных) и по результатам этих испытаний оценивают математическое ожидание γ_{cp} и среднее квадратическое отклонение σ_x случайного процесса, т. е. данные, необходимые для определения $P(t)$. Последо-

вательность расчета (статистического испытания) следующая. После ввода необходимых данных (оператор 2) через счетчик испытаний (оператор 3) производится выбор конкретных для данного испытания значений P , v и K (оператор 4). Для этого имеются подпрограммы, в которых заложены гистограммы или законы распределения, характеризующие данные значения или величины, их определяющие. Например, вместо давлений p на поверхности трения может быть задан закон распределения внешних нагрузок P , действующих на элемент станка. В этом случае в подпрограмме по выбранному значению P рассчитывается $p = F(P)$, в простейшем случае $p = \frac{P}{S}$, где S — площадь поверхности трения.

Для выбора конкретного значения каждого из параметров с учетом их законов распределения применяют генератор случайных чисел, с помощью которого выбирают некоторое случайное число. Обычно генератор выдает равномерно распределенные числа, которые с помощью стандартных подпрограмм могут быть преобразованы так, что их плотность распределения будет соответствовать данному закону.

Для учета рассеяния начальных параметров в программу закладывают сведения о законах распределения исходных характеристик станка. Например, погрешности изготовления деталей обычно распределяются в пределах допуска δ по нормальному закону ($\sigma_a = 1/6\delta$), а такие положительные величины, как погрешность эксцентриситета вала, — по закону Максвелла и т. п. При наличии опытного образца данные по α_0 и σ_0 выдают на основе его кратковременных испытаний.

После получения случайных значений для каждого опыта рассчитывается скорость процесса повреждения γ (оператор 5) и по ней скорость процесса изменения параметра γ_x (оператор 6). Данная процедура повторяется N раз, и каждое полученное значение γ_x попадает во внешнюю память машины. После накопления необходимого числа статистических данных, т. е. при $n = N$ (оператор 7), производится определение γ_{cp} и σ_x (операторы 8 и 9), после чего возможен как рас-

чет вероятности безотказной работы $P(t)$ (оператор 10), так и построение гистограммы распределения γ_x и выдача на печать всех необходимых данных (оператор 11).

Прогнозирование надежности методом Монте-Карло позволяет вскрыть статистическую природу процесса потери изделия работоспособности и оценить влияние отдельных факторов. Например, для рассмотренной задачи можно определить, насколько повысится вероятность безотказной работы, если приведены мероприятия по уменьшению удельных давлений в зоне трения (изменение конструкции узла), уменьшено значение коэффициента K (применен новый материал), сужен диапазон режимов работы станка, изменены параметры законов $f(P)$ и $f(v)$.

§ 4. Надежность сложных систем

Большинство изделий машиностроения являются сложными системами, состоящими из отдельных деталей, агрегатов, систем управления и т. п.

Под сложной системой будем понимать объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы. Понятие сложной системы условно. Большей сложностью обладают, как правило, автоматизированные системы. Под элементом будем понимать составную часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами. Условность расчленения сложной системы на элементы может быть продемонстрирована на примере автоматической станочной линии. При рассмотрении работоспособности линии элементами могут служить отдельные станки, транспортные и грузочные устройства и другие достаточно сложные объекты. В свою очередь, каждый станок представляет собой весьма сложную систему, и при необходимости оценки его надежности он также может быть разделен на отдельные сборочные единицы, сборочные единицы на подузлы и детали, а деталь на отдельные части.

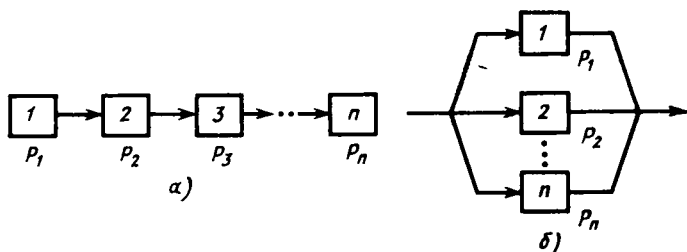


Рис. 144. Схема последовательного и параллельного соединения элементов сложной системы

При расчленении сложной системы на отдельные элементы, для каждого из которых можно отдельно определить вероятность безотказной работы, для расчета надежности широко используют структурные схемы. В этих схемах каждый i -й элемент характеризуется значением P_i — вероятностью его безотказной работы в течение заданного периода времени. Требуется определить вероятность безотказной работы $P(t)$ всей системы. Такой расчет обычно называют расчетом схемой надежности.

Наиболее характерен случай, когда отказ одного элемента выводит из строя всю систему, например, при последовательном соединении элементов (рис. 144, а). Вероятность безотказной работы такой системы при независимости отказов равна произведению вероятностей безотказной работы элементов (по теореме умножения вероятностей независимых событий):

$$P(t) = P_1 P_2, \dots, P_n = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (151)$$

При одинаковой надежности элементов формула (151) примет вид

$$P(t) = P_i^n. \quad (152)$$

Сложные системы, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью из-за наличия большого числа элементов. Например, если элемент состоит всего из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за выбранный промежуток времени составляет $P_i = 0,99$, то вероятность безотказной работы элемента $P(t) = (0,99)^{50} \approx 0,55$. Если же элемент с аналогич-

ной безотказностью элементов состоит из 400 деталей, то $P(t) = (0,99)^{400} = 0,018$, т. е. узел становится практически неработоспособным.

Для повышения надежности сложных систем можно применять резервирование, когда при выходе из строя одного из элементов дублер выполняет его функции, и элемент не прекращает своей работы. Резервирование может значительно повысить надежность системы. Например, при постоянном (нагруженном) резервировании, когда резервные элементы постоянно присоединены к основным и находятся в одинаковом с ними режиме работы (рис. 144, б), вероятность безотказной работы $P(t)$ системы может быть подсчитана следующим образом. Пусть $F_1, F_2, \dots, F_m$ — вероятности появления отказа каждого из m элементов за время t . Тогда отказ системы — это событие, которое будет иметь место при условии отказа всех элементов; вероятность совместного появления всех отказов (по теореме умножения) составит

$$F(t) = F_1 F_2, \dots, F_m = \prod_{i=1}^m F_i. \quad (153)$$

Поэтому безотказность системы с параллельно резервированными элементами

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i). \quad (154)$$

Например, если вероятность безотказной работы каждого элемента $P = 0,9$, $m = 3$, то $P(t) = 1 - (0,1)^3 = 0,999$. Таким образом, вероятность безотказной работы системы резко повышается, и становится возможным

создание надежных систем из ненадежных элементов. При расчете схемной надежности данную схему представляют в виде структурной схемы, в которой элементы, отказ которых приводит к отказу всей системы, изображаются последовательно, а резервные элементы или цепи — параллельно.

При анализе надежности станка и его элементов применение метода структурных схем обычно ограничено. Это вызвано тем, что отдельные элементы станка не являются независимыми, и надо рассматривать всю конструкцию, учитывая взаимодействие отдельных элементов.

Делить систему на независимые элементы и применять формулы (151) и (154) для расчета $P(t)$ сложных систем можно для станков и автоматических линий в следующих основных случаях:

1. При рассмотрении автоматических линий и технологических комплексов, состоящих из отдельных станков, агрегатов и подсистем.

2. При рассмотрении нескольких независимых выходных параметров станка; если известна вероятность безот-

казной работы станка по отношению к каждому параметру $P_i(t)$, для оценки параметрической надежности всего станка можно применять формулу (151).

3. При анализе надежности систем, состоящих из отдельных агрегатов, особенно в тех случаях, когда их принцип работы и особенность функционирования представляют самостоятельную конструктивную единицу (элементы гидросистем, целевые механизмы станков — коробка скоростей, механизм загрузки и подачи и др.).

Для механических систем и изделий для повышения надежности характерно применение принципа избыточности, который является более общим, чем резервирование.

Создание запасов прочности, износоустойчивости (например, за счет увеличения площади опорных поверхностей), жесткости, виброустойчивости, теплоустойчивости и т. п. приводит к тому, что повышается запас надежности, поскольку параметры станка удаляются от предельных состояний.

Глава 19

Износ станка и его механизмов

§ 1. Износ как основная причина потери станком работоспособности

Износ направляющих, ходовых винтов, механизмов зажима и фиксации, различных узлов трения является основной причиной потери станком начальной точности в процессе его эксплуатации. Поэтому повышение надежности станков связано в первую очередь с повышением их износостойкости.

Изнашивание — это процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала и (или) его остаточной деформации. Изнашивание может сопровождаться процессами коррозии, оно является сложным физико-химическим процессом. При контакте двух сопряженных поверхностей и их относительном пере-

мещении в поверхностных слоях возникают механические и молекулярные взаимодействия, которые приводят к разрушению микрообъемов поверхностей. В процессе изнашивания исходный (технологический) микрорельеф преобразуется в эксплуатационный.

Основное влияние на процесс изнашивания оказывает постоянное возникновение и нарушение фрикционных связей, которые имеют двойственную молекулярно-механическую природу.

Основным процессом, возникающим при трении материалов и приводящим к износу, является упруго-пластическая деформация как результат взаимодействия микрорельефов поверхностей. В свою очередь этот процесс сопровождается целой гаммой производных физических, химических и механических процессов, протекающих на поверхностях и в поверхностных слоях трущихся тел.

Это процессы окисления, теплофизические и коррозионно-механические процессы, усталостное разрушение, поверхностные явления (адсорбция) и др. Все виды изнашивания можно разделить на три основные группы: 1) механическое, происходящее в результате только механических взаимодействий материалов изделия; 2) молекулярно-механическое, сопровождающееся также взаимодействием молекулярных или атомарных сил; 3) коррозионно-механическое, происходящее при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой.

Наиболее часто в станках встречаются следующие виды изнашивания.

Абразивное изнашивание сопровождается появлением на поверхностях абразивных частиц, разрушающих поверхность за счет резания и царапания с отделением стружки.

Усталостное изнашивание является следствием циклического воздействия на микровыступы трущихся поверхностей. Отделение частиц может также происходить в результате наклепа поверхностного слоя, который становится хрупким и разрушается. Иногда этот вид изнашивания называют изнашиванием при хрупком разрушении. Следует различать контактную усталость поверхностных слоев, которая возникает при чистом качении и проявляется в развитии местных очагов разрушения (питтинг), и усталостный износ, когда при трении скольжения отделение микрообъемов поверхностей связано с усталостной природой их разрушения.

Окислительное изнашивание происходит при наличии на поверхности трения защитных пленок, образовавшихся в результате взаимодействия материала с кислородом. Следует иметь в виду, что наличие окисных пленок не исключает возможности их усталостного разрушения, а лишь вносит свою специфику, так как разрушается более хрупкий материал.

Для расчета узлов трения на износ и выбора рациональных материалов, конструктивных параметров и условий работы необходимо знать законы изнашивания материалов. Закономерность изменения износа во времени характеризуется тремя периодами — прира-

боткой с затухающей интенсивностью износа, нормального износа, когда скорость процесса изнашивания постоянна, и периодом катастрофического износа, который не характерен для большинства деталей станка. Основным является период установившегося износа и при расчетах для большинства случаев можно принять линейную зависимость между временем изнашивания t и величиной износа U , т. е. считать, что в период нормальной эксплуатации станка скорость изнашивания γ остается постоянной:

$$\gamma = \frac{U}{t} = \text{const.} \quad (155)$$

Давление p и скорость относительно скольжения v — основные факторы, определяющие скорость изнашивания. Зависимость износа от p и v определяется прежде всего видом изнашивания, каждому виду соответствует определенная закономерность. Можно считать, что для абразивного и усталостного изнашивания линейный износ U прямо пропорционален удельному давлению p на поверхности трения и пути трения S , т. е. U непосредственно не зависит от скорости относительного скольжения (закон проф. М. М. Хрушова):

$$U = Kpv t = KpS, \quad (156)$$

где K — коэффициент, характеризующий износостойкость материалов и условия работы данной пары (смазка, степень изоляции поверхностей от загрязнения и др.).

Разделив обе части равенства на время работы сопряжения t , получим, что скорость изнашивания γ пропорциональна скорости относительного скольжения v и давлению p :

$$\gamma = Kpv. \quad (157)$$

Эти законы можно применять при расчете изнашивания многих деталей станка: направляющих скольжения, дисков фрикционных муфт, ходовых винтов и гаек, кулисных механизмов и др. В общем случае зависимость скорости изнашивания может быть выражена степенной функцией от давления и скорости относительного скольжения:

$$\gamma = Kp^m v^n. \quad (158)$$

Обычно при изнашивании $n = 1$. На значение коэффициента износа K влияют характеристики применяемых материалов пары, условия трения и смазка.

Износ материала характеризуется скоростью изнашивания $\dot{U}$ или интенсивностью изнашивания j . Интенсивность изнашивания является безразмерной величиной — это отношение толщины истертого слоя к пути трения.

Для оценки износа поверхности основной характеристикой является линейный износ U — изменение размера детали в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. В общем случае износ распределяется по поверхности трения неравномерно, поэтому $U = F(x; y)$, где x, y — координаты поверхности трения.

Износ происходит при трении двух сопряженных поверхностей, и изнашиваются обе поверхности одновременно. Это приводит к изменению взаимного положения сопряженных поверхностей.

Износ сопряжения — показатель взаимного сближения сопряженных деталей при их износе. Износ сопряжения измеряют геометрическими параметрами (одним или несколькими), определяющими изменение относительного положения сопряженных деталей, происшедшее в результате износа их поверхностей. При этом большое значение имеют конструктивные и кинематические особенности данной пары, так как они определяют характер и направление возможного перемещения (сближения) деталей при износе.

Можно указать следующие основные виды расчета на изнашивание.

1. По удельным нагрузкам (давлению) подсчитывают давления (средние или максимальные), действующие на поверхности трения, и полученные значения сравнивают с допустимыми. Последние берут, как правило, из практики, и их значения соответствуют длительному сохранению работоспособности сопряжения для аналогичных условий работы. Зная давление, рассчитывают направляющие скольжения станков (см. гл. 11), гайки ответственных ходовых винтов, некоторые типы подшипников скольжения и другие сопряжения.

Давление — один из главных, но не единственный фактор, определяющий скорость изнашивания, поэтому данный расчет позволяет лишь приблизительно судить о размерах сопряжений, что иногда может привести к неправильным выводам о способах повышения износостойкости конструкции.

2. Расчет по величине износа и форме изношенной поверхности позволяет указать основные пути повышения долговечности сопряжения как при конструировании, так и при эксплуатации. При расчете формы изношенной поверхности определяется величина износа U поверхности сопряженных деталей в каждой точке, величина эпюры давлений p на поверхности трения и изменение их взаимного положения в результате износа, т. е. износ сопряжения. Этот расчет базируется на закономерностях изнашивания материалов и учитывает конфигурацию сопряжения.

§ 2. Расчет на износ направляющих скольжения

От направляющих станков во многом зависит точность обработки. Расчет направляющих скольжения по допустимым давлениям недостаточен для того, чтобы судить о долговечности направляющих. Главную роль в потере станков точности играет износ направляющих по длине, в результате чего искажается траектория движения суппорта или стола.

При расчете направляющих на изнашивание исходят из следующих предпосылок.

1. Величина износа U пропорциональна пути трения S и давлению p :

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1 p S; \\ U_2 &= K_2 p S, \end{aligned} \right\} \quad (159)$$

где U_1, U_2 — износ соответственно направляющих станины и суппорта стола; K — коэффициент абразивного изнашивания, показывающий величину линейного износа (мк) при действии давления в 1 МПа на пути трения в 1 км для данной пары материалов при данных условиях изнашивания; K_1 — коэффициент износа материала станины; K_2 — коэффициент износа материала суппорта.

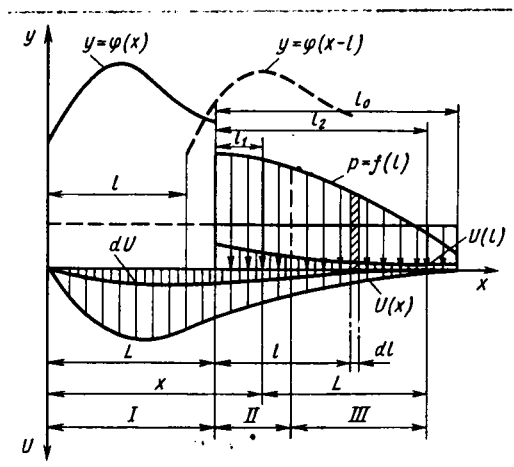


Рис. 145. Схема для расчета направляющих на износ

2. Начальная эпюра давлений при изнашивании сохраняется, т. е. ее перераспределение в результате износа поверхностей незначительно.

3. Известна кривая распределения $\varphi(x)$ перемещений ползуна (суппорта) по длине направляющих. Эти перемещения связаны, например, с обработкой на станке различных деталей. Ординаты данной кривой характеризуют ту долю общего пути трения, которая приходится на данное положение суппорта. Например, если на станке обрабатывают одинаковые детали и суппорт совершает постоянный ход, то на каждый участок направляющих приходится равная доля общего пути трения и кривая распределения будет представлять прямую, параллельную оси абсцисс. Если на станке обрабатывают различные детали, то кривая распределения будет отражать перемещения суппорта при обработке этих деталей и, следовательно, характер загрузки станка.

Необходимо отметить, что при обработке разнообразных деталей на универсальных станках распределение длин обработки подчиняется законам теории вероятностей для больших чисел. При определении формы изношенной поверхности направляющих станины и суппорта (ползуна) примем следующие обозначения (рис. 145): $U(x)$ — искомая величина линейного износа U_1 направляющих станины по длине x :

$0 \leq x \leq (L + L_0)$; $U(l)$ — искомая величина линейного износа U_2 направляющих суппорта по длине l : $0 \leq l \leq l_0$; L — максимальный ход суппорта; l_0 — длина направляющих суппорта; $p = f(l)$ — уравнение эпюры давлений; $y = \varphi(x)$ — кривая распределения общего пути трения (отнесена к левой точке суппорта); S — путь трения, который проходит каждая точка направляющих суппорта за рассматриваемый промежуток времени:

Рассмотрим методику определения функций $U(l)$ и $U(x)$ исходя из сделанных выше предположений. Функцию $U(l)$ определить просто, так как каждая точка направляющей суппорта изнашивается на протяжении всего пути трения S и на нее действует постоянное удельное давление $p = f(l)$. Следовательно, кривая износа будет подобна эпюре давлений:

$$U(l) = K_2 S f(l). \quad (160)$$

Однако основную роль в потере станком точности и виброустойчивости играет форма изношенной поверхности направляющих станины, определяемая функцией $U(x)$. Для отыскания этой функции рассмотрим, как изнашивается участок направляющих станины с координатой x (рис. 145). При перемещении суппорта этот участок станины изнашивается под действием давлений, определяемых той частью эпюры $f(l)$, которая при перемещении суппорта «проходит» над участком с координатой x . Каждый элемент эпюры давлений с координатой l изнашивает (как будем условно говорить) направляющую станины на величину, пропорциональную $p dl = f(l) dl$. Чтобы определить элементарный износ dU , вызванный воздействием $p dl$, необходимо определить ту часть общего пути трения, которую проходит элемент эпюры давлений $p dl$ при изнашивании участка направляющих с координатой x . Для этого воспользуемся кривой распределения $\varphi(x)$. Так как уравнение этой кривой характеризует перемещение левой точки суппорта с $l=0$, то для точки суппорта с координатой l уравнение кривой примет вид $y = \varphi(x-l)$, и доля пути трения, приходящаяся на точку с координатой x , будет равна $S\varphi(x-l)$.

Таблица 12

Пределы интегрирования в формуле (161)

$\frac{L}{l_0}$	Участок (см. рис. 145)	Пределы		
		участка	интегрирования	
>1	I	$0 \leq x \leq l_0$	0	x
	II	$l_0 \leq x \leq L$	0	l_0
	III	$L \leq x \leq L + l_0$	$x - L$	l_0
<1	I	$0 \leq x \leq L$	0	x
	II	$L \leq x \leq l_0$	$x - L$	x
	III	$l_0 \leq x \leq l_0 + L$	$x - L$	l_0

Поэтому износ в точке x от воздействия элемента эпюры давлений pdl

$$dU = K_1 S \varphi(x-l) f(l) dl.$$

Чтобы определить износ в точке x от воздействия суппорта с эпюрой давления на участке от l_1 до l_2 , необходимо просуммировать элементарные участки pdl в указанных пределах:

$$U(x) = K_1 S \int_{l_1}^{l_2} \varphi(x-l) f(l) dl. \quad (161)$$

Эта формула является общей для различных случаев. Пределы интегрирования определяют в зависимости от того, какой участок эпюры удельных давлений воздействует на данную точку станины с координатой x (табл. 12).

Например, при $L < l_0$ и постоянном ходе суппорта, т. е. $\varphi(x) = 1/L$ и треугольной эпюре давлений $p = \frac{p_0}{l_0} l$ уравнение изношенной поверхности для участка l будет иметь вид

$$U(x) = K_1 S \int_0^x \frac{1}{L} \frac{p_0}{l_0} l dl = \frac{K_1 S p_0}{2 L l_0} x^2,$$

где p_0 — наибольшее давление эпюры $p = f(l)$.

В общей формуле (161) учтено влияние основных факторов на форму изношенной поверхности направляющих: K_1 отражает износостойкость материалов и условия изнашивания; S — интенсивность работы станка во времени; $p = f(l)$

отражает конструкцию стола, т. е. расположение сил (характер эпюры давлений) и величины действующих сил; $\varphi(x)$ характеризует технологические процессы обработки, осуществляемые на станке.

Пользуясь полученной формулой, можно проанализировать влияние отдельных факторов на величину и характер $U(x)$ и в каждом конкретном случае указать наиболее эффективные пути для уменьшения величины износа и получения более равномерной формы изношенной поверхности, которая непосредственно связана с точностью работы, виброустойчивостью конструкции и возможностью компенсации износа.

Например, из этой формулы следует, что изменять форму изношенной поверхности направляющих металлоулучшающих станков можно не только улучшая конструкции, но и правильно проектируя технологические процессы обработки и рациональной загрузки станка.

При проектировании направляющих, когда имеется большое число входных данных для выбора оптимальных реше-

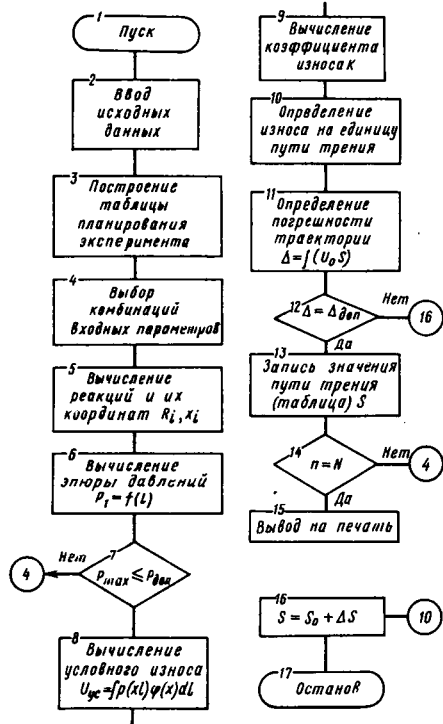


Рис. 146. Блок-схема расчета направляющих на ЭВМ

ний, применяют ЭВМ. Упрощенная блок-схема программы для расчета на ЭВМ оптимальных параметров направляющих из условия длительного сохранения точности движения приведена на рис. 146.

В начале (оператор 1) вводят массив исходных данных: размеров сопряжения, действующих сил, условий эксплуатации (например, концентрации абразива в смазке) и др. с выявлением возможных пределов их изменения (оператор 2). Затем строят таблицу планирования эксперимента, в данном случае вычислений (оператор 3), из которой выбирают комбинации исходных данных при каждом цикле испытаний (оператор 4). Поскольку число входных параметров достаточно велико и каждый из них может изменяться в определенных пределах (или иметь несколько уровней), то для выявления оптимального варианта необходимо проделать в общем случае большое число циклов расчета (экспериментов). ЭВМ осуществляет построение таблицы планирования и выбирает первую комбинацию входных параметров (оператор 4).

Затем вычисляются реакции, действующие на гранях направляющих и координаты их приложения (оператор 5), что позволяет получить уравнение эпюры давлений на каждой из направляющих (оператор 6). Затем производится проверка, находится ли максимальное значение эпюры давлений $p_{\max}$ в допускаемых пределах (оператор 7). Если это давление превосходит допустимое $p_{\text{доп}}$, то выбирается следующая комбинация исходных параметров. Если же $p_{\max} \leq p_{\text{доп}}$, то переходят к определению формы изношенной поверхности направляющих. Вычисление износа производится по специальной подпрограмме (оператор 8), при этом вычисляется условный износ, т. е. та часть зависимости $U(x)$, которая определяет форму изношенной поверхности. Подпрограмма учитывает, что эпюра износа направляющих является суммой различных циклов работы механизма, например при движении стола в одну и другую сторону, когда изменяется силовая нагрузка в сопряжении, или при рабочем и холостом ходе и т. д.

Далее вычисляется значение коэффициента износа K (оператор 9). В под-

программу заложены данные об условиях эксплуатации, возможное изменение K по длине направляющих, условия, характеризующие подачу смазки, возможные варианты материалов пары и другие данные, позволяющие оценить пределы изменения и значения коэффициента износа K . Все эти расчеты позволяют определить форму изношенной поверхности и величину износа в каждой точке направляющих, отнесенную к единице пути трения (оператор 10). Затем оценивается погрешность траектории движения ведомого звена Δ при перемещении стола по изношенным направляющим при некотором значении пути трения $S = S_0$ (оператор 11).

Полученная погрешность Δ сравнивается с допустимой (оператор 12). Если $\Delta < \Delta_{\text{доп}}$, то путь трения увеличивается на величину ΔS , и расчет повторяется до тех пор (оператор 16), пока не определится значение пути трения S , при котором износ направляющих достигает предельного значения. Это значение S заносится в таблицу (оператор 13). Затем все вычисления повторяются при других комбинациях входных параметров до тех пор, пока число вычислений n не достигнет установленного значения N (оператор 14). Каждая комбинация входных параметров и соответствующая величина пути трения S , которая пропорциональна сроку службы до достижения параметром значения $\Delta = \Delta_{\text{доп}}$, выводятся на печатающее устройство в табличной форме (оператор 15). После окончания установленного числа циклов вычислений машина включается (оператор 17).

Расчет можно построить и таким образом, чтобы определялась погрешность траектории при заданном (базовом) пути трения. В этом случае оптимальный вариант будет обеспечивать наименьшие искажения траектории ведомого звена при одинаковой длительности работы механизма. Выполненные при помощи ЭВМ вычисления позволяют выбрать оптимальное сочетание конструктивных факторов, обеспечивающих наибольшую работоспособность, оценить среднее значение и рассеяние наработки при колебании эксплуатационных факторов, оценить вероятность безотказной работы механизма в течение заданного периода времени.

§ 3. Расчет предельно-допустимых износов

При расчете станка на износ важно установить допустимые значения износа отдельных деталей и сопряжений, т. е. установить их предельные износы $U_{\max}$. Эта задача является сложной, так как к деталям любой машины предъявляются разнообразные требования.

При расчете предельных износов прежде всего устанавливают критерии (признаки) предельного износа. Они зависят от того влияния, которое оказывает износ детали на работу станка. Можно выделить три группы критериев: 1) в результате износа станок не может больше работать (происходит поломка детали, заклинивание механизма или невыполнение им своих функций); 2) износ приводит к попаданию станка в зону интенсивного выхода его из строя (возникают удары, интенсивный износ поверхностей, вибрации станка); 3) в результате износа характеристики станка и его механизмов выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (ухудшается качество продукции, понижается производительность, падает КПД, увеличивается шум).

Критерии предельного износа в одних случаях связаны только с работой данного сопряжения или детали, в других — с работой нескольких деталей механизма. Для деталей, ремонтируемых при периодических плановых ремонтах, допустимые износы $U_{\text{доп}}$ будут меньше или равны предельным $U_{\max}$, так как деталь не должна выйти из строя в течение последующего межремонтного периода. Если длительность межремонтного периода, т. е. время между двумя плановыми ремонтами T_1 , то за это время износ детали увеличится на γT_1 . Поэтому допустимое значение износа $U_{\text{доп}}$, начиная с которого при периодических ремонтах необходимо ремонтировать деталь, $U_{\text{доп}} = U_{\max} - \gamma T$. Учитывая, что $\gamma = \frac{U_{\text{доп}}}{T}$, где T — время работы детали до ремонта, получим

$$U_{\text{доп}} = U_{\max} - \frac{U_{\text{доп}} T_1}{T},$$

откуда

$$U_{\text{доп}} = \frac{U_{\max}}{1 + \frac{T_1}{T}}.$$

Если K — порядковый номер данного периодического ремонта с момента последнего ремонта детали, то время работы детали будет $T = K T_1$, и формула для подсчета допустимого износа примет вид

$$U_{\text{доп}} = U_{\max} \frac{K}{K + 1}. \quad (162)$$

Пример. Деталь имеет глубину цементированного слоя 0,8 мм и предельный износ $U_{\max}$ равен 0,65 мм (80% от глубины слоя). Надо ли ремонтировать деталь, если при ее измерении при третьем периодическом ремонте износ оказался равным 0,55 мм?

Подсчитываем $U_{\text{доп}}$ по формуле (162):

$$U_{\text{доп}} = 0,65 \frac{3}{3 + 1} \approx 0,49 \text{ мм.}$$

Следовательно, деталь надо ремонтировать, так как хотя ее износ и меньше, чем $U_{\max}$, но она не дослужит до следующего периодического ремонта.

Признаки третьей группы критериев для определения $U_{\max}$ наиболее характерны для сопряжений современных станков. Предельное состояние часто наступает не из-за поломки или возникновения недопустимых условий работы станка, а из-за снижения его характеристик.

Для получения аналитических зависимостей для $U_{\max}$ необходимо установить связь между погрешностью работы станка и параметрами, характеризующими величину и форму изношенной поверхности. Так, например, при износе направляющих станины происходит искажение траектории движения резца и соответственно снижается точность обработки.

На основании исследования формы изношенной поверхности направляющих станины получена формула для подсчета предельно допустимых износов направляющих токарных станков (для участка с наибольшим износом) в зависимости от требуемой точности обработки [7]:

$$U_{\max} = 320 \frac{\Delta}{L}, \quad (163)$$

где Δ — предельное отклонение диаметра обрабатываемой детали, вызванное износом направляющих; L — длина обтачивания (все параметры в мм).

Это выражение показывает, что допустимый износ направляющих непосредственно связан с требуемой точностью обработки и размерами (длиной) обрабатываемой детали. При больших допусках на диаметр и коротких изделиях допустимый износ может быть значительным.

§ 4. Основные методы повышения износостойкости станков

Повышение износостойкости сопряжений — один из основных путей для создания надежных станков с высокими техническими показателями. Конструкторам хорошо известны такие методы, как применение износостойких материалов, создание надежной системы смазки, изоляция трущихся поверхностей от загрязнения, компенсация износа, применение быстросменных деталей. Однако при конструировании современных станков все чаще приходится применять и другие принципы проектирования, обеспечивающие их

высокую износостойкость. Сформулируем основные из них.

1. Создание конструкций, износ которых наименьшим образом влияет на работу механизма или станка.

2. Принцип равномерного износа поверхностей — один из методов осуществления предыдущего, более общего принципа — во многих случаях способствует повышению долговечности.

3. Создание постоянных условий на поверхности трения (температурных, силовых и т. д.) гарантирует правильную работу многих ответственных сопряжений, малый их износ и отсутствие недопустимых форм износа.

4. Перенос внешних воздействий с ответственных сопряжений на менее ответственные — это относится, в первую очередь, к перенесению сил, действующих в ответственных сопряжениях, на менее ответственные элементы для повышения долговечности и точности работы механизма.

5. Автоматизация регулировок и компенсация износа — новое направление при проектировании станков.

Глава 20

Обеспечение надежности

§ 1. Технологическая надежность станков

Спроектированный станок, в котором заложен определенный уровень надежности, будет обладать им лишь в том случае, если в процессе изготовления и эксплуатации станка принять меры для обеспечения требуемой надежности. Так, при изготовлении и сборке станка применяют методы управления качеством и надежностью. При эксплуатации станков для обеспечения их надежности необходимо проводить испытания на надежность и оценки их состояния (диагностики), применять рациональные формы ремонта и технического обслуживания; организовать информацию о действительной надежности станков и использовать ее для постоянного повышения уровня выпускаемых станков. Необходимо также для обеспечения надежности сложных и точных станков использовать широкие возможности автоматики по регулированию и поддержанию выходных параметров системы.

Надежность станков можно рассматривать с двух основных позиций — как надежность машины, когда оценивают все виды отказов, и как надежность технологической системы, когда принимают во внимание лишь те отказы, которые связаны с выпуском некачественной продукции.

Для оборудования особое значение имеет рассмотрение его технологической надежности, которая непосредственно связана с качеством выпускаемой продукции.

Технологическая надежность станка — это его свойство сохранять в заданных пределах и во времени значения показателей, определяющих качество осуществления технологического процесса. К показателям качества технологического оборудования относятся его геометрическая точность, жесткость, виброустойчивость и другие показатели, которые определяют точность обработки, качество поверхности и физические характеристики материала обрабатываемой детали. Хотя показатели качества изготавливаемых изделий зависят

не только от оборудования, но и от технологической оснастки, инструмента, режимов обработки, квалификации рабочего и других причин, но возможности оборудования играют, как правило, основную роль. Поэтому не только обеспечение высоких начальных характеристик технологического оборудования, но и длительное их сохранение в процессе работы — необходимое условие для надежного осуществления технологического процесса.

Технологическое оборудование в процессе эксплуатации постепенно теряет свои начальные характеристики, что приводит к снижению качественных показателей технологического процесса. При этом восстановление утраченной работоспособности связано с большими затратами времени и средств. Если, например, замена износившегося инструмента занимает доли минуты, то износ направляющих станков выводит их из строя на несколько дней. Постепенное ухудшение характеристик станков приводит к уменьшению запасов точности, к росту вероятности получения некачественной продукции, к сокращению технологических возможностей оборудования. Одним из наиболее активных методов повышения технологической надежности станков является метод автоматической подналадки и саморегулирования его параметров, когда станок автоматически восстанавливает изменившиеся параметры. В зависимости от скорости воздействия различных процессов на параметры станка системы саморегулирования будут иметь различную структуру.

При воздействии быстротекущих процессов в системах саморегулирования должны быть обеспечены непрерывный контроль изменяющихся параметров и возможность непрерывного регулирования (подналадки) механизмов машин.

В качестве примеров таких систем в станках-автоматах можно указать на обратную связь в станках с программным управлением, которая компенсирует влияние зазоров, деформаций, различных случайных воздействий на правильность соблюдения заданного закона движения рабочего органа станка.

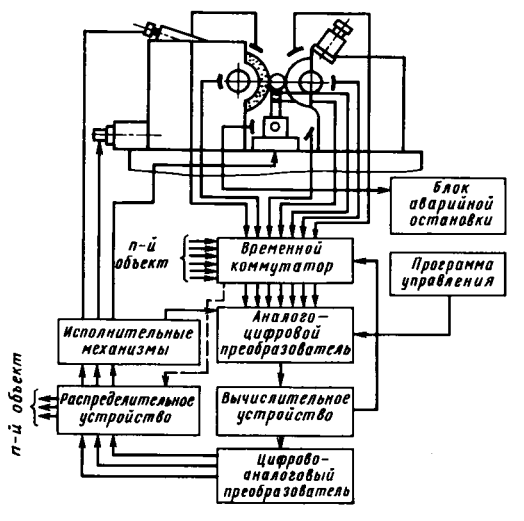
К этой же группе систем относятся самоподнастраивающиеся станки

(станки с адаптивным управлением), где производится автоматическое регулирование величины подачи столов и суппортов станка из условия сохранения постоянной силы резания или величины упругой деформации системы.

При воздействии на оборудование процессов средней скорости (изменение температуры как самой машины, так и окружающей среды, износ режущего инструмента) для систем автоматической подналадки характерно наличие непрерывного контроля изменяющихся параметров и периодическое регулирование механизмов. Например, известны методы активного контроля деталей и методы компенсации износа шлифовальных кругов в станках.

Существуют оригинальные решения для автоматической подналадки станков с учетом процессов средней скорости, и в первую очередь тепловых воздействий. К таким устройствам относятся температурные компенсаторы положения шпиндельной бабки, поддержание постоянной температуры масла в гидросистеме, равномерный подогрев стенок станины станка и другие методы. Более совершенны системы регулирования с обратной связью.

Характерным для систем автоматической подналадки этой группы является периодический контроль параметров и периодическая подналадка механизмов. Эти системы должны автоматически включаться через определенный достаточно длительный промежуток времени и производить проверку параметров машины в течение небольшого периода времени. Если эти параметры изменились, то осуществляется регулирование соответствующих рабочих органов машин. Таким образом, для повышения технологической надежности сложного высокопроизводительного оборудования намечается новая тенденция, которая заключается в применении самой автоматики для обеспечения длительного выполнения машиной своего служебного назначения в разнообразных условиях эксплуатации, в придании машинам новых качеств автоматического восстановления утраченных функций и приспособления (адаптации) к изменениям окружающей среды. Развитие этих идей означает переход от пассивных мето-



147. Схема управления технологической надежностью бесцентрово-шлифовальным станком

дов решения проблемы технологической надежности оборудования к активным.

Следует отметить, что тенденции повышения надежности средствами автоматики характерны не только для технологического оборудования, но и для других сложных автоматизированных машин и систем.

• Схема системы для управления технологической надежностью (с применением ЭВМ) для бесцентрово-шлифовального станка показана на рис. 147. Точность бесцентрового шлифования (погрешность диаметра и конусообразность) зависит от относительного положения опорного ножа 9, ведущего и шлифовального кругов. В процессе эксплуатации их положение меняется из-за температурных и упругих деформаций и износа. Кроме того, засаливание кругов вызывает увеличение вибраций и дестабилизирует положение детали 8 в зоне обработки. Информация о состоянии рабочих органов, регистрируемая соответствующими датчиками (1—7), через аналого-цифровой преобразователь передается в вычислительное устройство. Например, для измерения линейных размеров используется дифференциальный индуктивный датчик, который обеспечивает измерение с точностью до 1 мкм. Вычислительное устройство производит анализ поступившей информации, рассчитывает

параметры точности обработки, сравнивает их с заданным полем допуска, оценивает возможность проведения подналадки, выбирает необходимый механизм подналадки и рассчитывает для него величину подналадочного импульса и его направление.

Преимущество данного метода заключается в том, что исключается непосредственное измерение диаметра каждой обрабатываемой детали, а следовательно, исключаются погрешности, связанные с измерением. Система анализирует также и уровень вибраций детали. С увеличением вибраций детали из-за засаливания кругов подается команда на проведение правки.

Для предупреждения возможности получения дефектных деталей из-за сбоя в работе вычислительного устройства или возникновения непредусмотренных системой управления ситуаций обрабатываемые детали контролируются датчиком предельных размеров. Датчик фиксирует только выход размеров детали за пределы поля допуска. Сигналы о наличии бракованных деталей поступают в блок аварийной остановки станка. Вычислительное устройство управляет через цифро-аналоговый преобразователь исполнительными механизмами, которые осуществляют два вида подналадочных перемещений: грубое — шлифовальной бабкой и точное — управляемым опорным ножом.

Информация о состоянии элементов станка вводится в вычислительное устройство дискретно через временной коммутатор. Коммутатор последовательно подключает датчики одного или нескольких станков через заданный интервал времени. Этот интервал может изменяться вычислительным устройством в зависимости от интенсивности воздействия процессов и требуемой частоты подналадок.

§ 2. Испытание станков на надежность

Объектом испытания на надежность могут быть отдельные механизмы станка, весь станок и система станков (автоматическая линия, участок, цех). При испытании на надежность относительно простых изделий (например, подшипников качения) можно накопить статистические данные по времени его

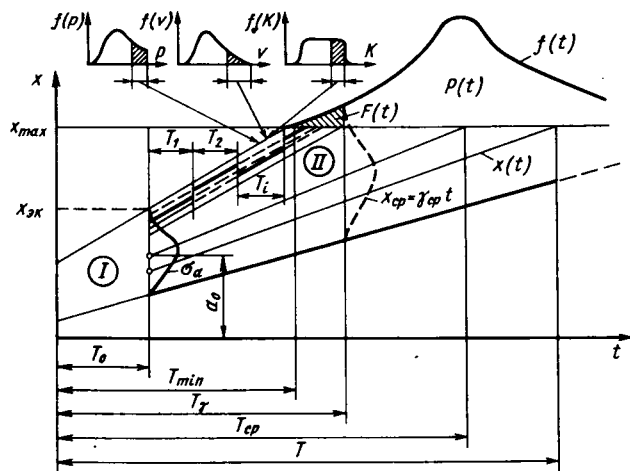


Рис. 148. Схема для испытания станка на надежность по выходному параметру точности

работы до отказа и на их основании выявить закон распределения сроков службы (наработки) $\hat{f}(t)$. Знание этого закона позволит получить любые показатели надежности. Однако испытание на надежность станков, которые являются сложными высокоразвитыми системами, представляет значительные трудности, особенно при наличии одного-двух образцов новых моделей. При этом важно не столько выявить конструктивные и технологические недоработки, которые проявляются в первый период испытания, сколько оценить общий уровень надежности станка, его способность сохранять свои параметры (и в первую очередь точностные) в течение длительного периода эксплуатации.

Применяемые методы ускоренных и форсированных испытаний станков на надежность обладают существенными недостатками: сокращение времени простоя станка и его непрерывное испытание незначительно ускоряет процесс получения необходимой информации; форсирование режимов и условий эксплуатации искажает данные о скоростях износа и изменении начальных параметров станка. Кроме того, полученные результаты испытаний по одному или нескольким образцам не могут даже приблизительно выявить статистическую картину возможной потери станком работоспособности. Испытание станка на надежность долж-

но опираться на общую модель потери им работоспособности (см. гл. 8) и сочетать испытание с прогнозированием.

При оценке точностной (технологической) надежности станков, когда данный выходной параметр x характеризует точность, которую может обеспечить станок, рассматривают два периода времени. Во-первых, межналадочный период T_0 , когда кроме начальных характеристик станка (геометрической точности, жесткости) проявляется влияние быстропротекающих процессов (вибрации, изменений нагрузок) и процессов средней скорости (тепловых деформаций) (зона I на рис. 148).

Во-вторых, необходимо рассмотреть период длительной эксплуатации, когда основную роль играет износ элементов станка (зона II, рис. 148). При этом случайный характер протекания процессов приводит к тому, что области существования параметров I и II оценивают вероятностными характеристиками.

Достижение любой реализацией процесса $x(t)$ предельного состояния $x_{\max}$ за некоторое время $t=T$ является отказом станка по данному параметру, а случайный характер изменения во времени параметра x приведет к формированию закона распределения сроков службы (наработки) до отказа $\hat{f}(t)$. Этот закон является полной

характеристикой надежности объекта. Он может быть получен экспериментально на основании статистической обработки данных по отказам или теоретически при знании закономерностей процессов и статистических характеристик режимов работы и условий эксплуатации машины. Однако непосредственное получение или подтверждение закона $f(t)$ в результате испытания станка является практически неосуществимой задачей, так как получение статистического ряда значений времени $t = T_i$ работы до отказа связано с большой длительностью испытания. Большинство значений $T_1, T_2, \dots, T_i$ будет значительно выше ресурса машины, поскольку требования к ее безотказности высоки.

В результате испытания станков на надежность необходимо в первую очередь определить следующие показатели: запас надежности по каждому из параметров: $K_n = \frac{x_{\max}}{x_{\text{эк}}}$, где $x_{\text{эк}}$ — эк-

спериментальное значение, которое может принимать параметр при эксплуатации станка с учетом его состояния (степени износа); вероятность безотказной работы станка $P(t)$ при принятом ресурсе $t = T_p$, или ресурс при заданной вероятности $P(t)$ (гамма-процентный ресурс). Ресурс определяет длительность работы станка до потери им точности. Его назначают в соответствии с системой ППР (длительностью работы станка до среднего или капитального ремонта).

Запас надежности для нового станка (или находящегося в данном состоянии) можно оценить за сравнительно короткий период времени, так как каждый цикл испытаний проводят в течение одного межналадочного периода T_0 (4—7 часов) и может быть накоплена статистика для оценки области I (рис. 148) при различных режимах работы станка. Знание K_n еще не дает представления о том, как скоро этот запас будет израсходован, но он является важной характеристикой надежности. Основной характеристикой надежности машины является оценка вероятности ее безотказной работы в течение длительного периода эксплуатации. При этом две группы причин приводят к вероятност-

ным процессам потери станком работоспособности. Во-первых, разнообразие условий и режимов эксплуатации и, во-вторых, рассеяние (в пределах допуска) характеристик самого станка. Рассмотрим возможные варианты построения методик испытания на надежность новых моделей станка при наличии одного-двух опытных образцов без применения методов форсирования за пределами допустимых нагрузок и условий работы станка.

Первый вариант испытаний заключается в доведении станка до отказа по установленным точностным параметрам при выбранных режимах работы станка (средних, типовых) и специально подготовленном объекте испытания (как правило, с высокими начальными показателями). Длительность таких испытаний достаточно велика, а полученные результаты (обычно одно значение наработки до отказа) отражают лишь свойства данного станка и принятые условия испытаний.

Второй вариант испытаний, при котором получают статистический ряд наработок станка до отказа при различных условиях испытания, а следовательно, устанавливают закон $f(t)$, является нереальным из-за его длительности.

Третий вариант испытаний заключается в получении закона распределения $f(t)$ за счет сочетания испытаний с прогнозированием процесса потери станком точности, в первую очередь в результате износа его базовых элементов (направляющих, ходовых винтов и др.). Для этого необходимо иметь аналитические зависимости, связывающие показатели надежности с характеристиками процессов и состояния машины, а также закономерности процессов изнашивания.

Так, в предположении нормального рассеяния выходных параметров машины и их линейного изменения во времени в результате износа была получена формула для оценки вероятности безотказной работы [см. гл. 18, формулу (140)]. Эту формулу можно использовать для сочетания испытания станка с прогнозированием его надежности, как это было рассмотрено выше (см. гл. 18 и рис. 143). Значения параметров a_0 и σ_a могут быть получены из испытания станка без учета процес-

сов износа, а характеристики потери станком точности из-за износа $\gamma_{\text{ср}}$ и $\sigma_{\text{с}}$ должны прогнозироваться. Прогнозирование надежности методом Монте-Карло позволяет вскрыть статистическую природу процесса потери станком работоспособности и оценить влияние отдельных факторов. Недостатком данного метода является использование для прогнозирования априорной информации о возможном ходе процесса потери станком работоспособности (в нашем случае потери точности из-за износа), так как трудно на основании испытания получить статистический ряд скоростей изменения точности станка при различных условиях и режимах его работы.

Четвертый вариант испытаний — испытание по экстремальному уровню — исходит из того, что для объектов с высокими требованиями к надежности нет необходимости выявлять весь закон распределения $f(t)$. Для решения задач надежности надо выявить лишь ту его часть в области более низких значений наработки до отказа, которая по площади равна допустимой по техническим требованиям вероятности отказа: $F(t) = 1 - P(t)$. Поэтому при испытании надо выявлять не все возможные реализации процесса потери станком точности, а лишь те, которые формируют границу области состояний. Именно она определяет условия, при которых в первую очередь возможен отказ при принятом ресурсе работы станка. Таким образом, для выбранного объекта испытания (можно иметь всего один или два станка) устанавливают экстремальные наиболее тяжелые условия испытания по следующим факторам: а) по режимам работы (скорости, нагрузки) — максимальные из допустимых для станка по условиям эксплуатации или наиболее тяжелые области (например, область возможных резонансных явлений для чисел оборотов) или их сочетание; б) по условиям работы — загрязнение масла или поверхностей трения, наложение вибраций, температурные воздействия и др.; в) по начальному состоянию станка — точность монтажа и выполнения элементов, зазоры в сопряжениях, жесткость и другие параметры должны иметь наихудшие значения в пределах допуска.

При испытании по экстремальному уровню можно применять различные методические подходы, которые позволят сократить время испытаний или увеличить объем получаемой информации. Наиболее простой вид испытаний состоит в доведении станка до отказа по точности (по каждому из параметров) при экстремальных условиях его работы. По этой одной реализации можно в первом приближении судить о ресурсе станка.

Второй вид испытаний заключается в прогнозировании хода процесса потери станком точности на основании более кратковременных испытаний. В этом случае испытание проводят в течение того периода времени, когда выявится ход процесса изменения начальных показателей станка.

Чем точнее методы измерения точностных параметров и износа базовых элементов станка, тем меньше время T_i , в течение которого проявляется данная реализация процесса. В этом случае можно применять третий вид испытаний по экстремальному уровню, когда после выявления данной реализации производят дальнейшее испытание станка на других режимах и выявляется соответственно другая реализация процесса (см. рис. 148). При этом выборе условий испытания, как и в рассмотренном случае для метода Монте-Карло, используют статистические данные по условиям эксплуатации, т. е. законы $f(p)$, $f(v)$, $f(K)$, а также учитывают возможное рассеяние в пределах допуска геометрической точности, жесткости и других показателей качества самого станка. Однако при испытании по методу экстремального уровня нет необходимости в использовании всех областей этих законов, а лишь тех, которые участвуют в формировании экстремальных реализаций, соответствующих области $F(t)$ закона $f(t)$ (рис. 148). При испытании по экстремальному уровню с выявлением одной крайней реализации, определяющей наихудшие условия работы станка, будет выявлен минимальный ресурс T_{min} , который дает гарантию безотказной работы станка в любых (в пределах допустимых) условиях эксплуатации и при наиболее тяжелых режимах обработки. При получении в результате испытания ряда реализаций, соответ-

ствующих области наиболее тяжелых условий работы станка может быть определен гамма-процентный ресурс T_γ (рис. 148).

Средний ресурс (при $P(t) = 0,5$) можно рассчитать и оценить при некоторых дополнительных испытаниях. Следует иметь в виду, что на работоспособность станка влияют и те элементы, которые не связаны непосредственно с параметрами точности, а могут изменять другие его характеристики — шум, КПД, тепловыделение в приводимых механизмах, нагрузки в отдельных звеньях и т. п. В этом случае при испытании могут лимитироваться и эти показатели.

§ 3. Анализ потоков отказов сложных систем

В процессе испытания сложных систем для оценки их выходных параметров и проверки правильности функционирования, а также при эксплуатационной апробации опытных образцов возникают отказы, которые проявляются как случайные события и образуют поток отказов (см. гл. 18). Оценка параметра этого потока и статистическая обработка полученных данных дают определенную информацию о надежности изделия. Во многих случаях ее рассматривают как основное испытание на надежность сложной системы. В первый период работы обычно возникают приработочные отказы, а затем значение параметра потока отказов стабилизируется. В этом случае закон распределения отказов экспоненциальный, и для характеристики надежности определяют средний срок службы или наработку на отказ.

Примером таких испытаний может служить освоение автоматических линий, в процессе которого фиксируют все возникающие отказы и на основе их статистической обработки строят график эмпирического распределения и проверяют его адекватность теоретическому (обычно экспоненциальному) закону.

Так, на рис. 149 показана типичная кривая распределения наработок до отказа при производственном испытании автоматической линии для механической обработки ступенчатых валов. Как видно из графика, частота отказов

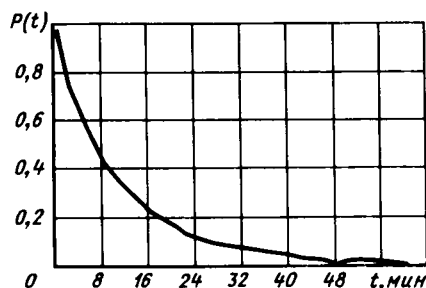


Рис. 149. Закон распределения наработок до отказов автоматической линии

весьма высока и вероятность безотказной работы линии в течение часа $P(t) \rightarrow 0$. Следует отметить, что сюда включены все виды отказов, как, например, износ режущего инструмента, застревание заготовки в транспортном лотке, несрабатывание механизма загрузки из-за попадания стружки, отказы системы управления и другие, в основном связанные с нарушением правильности функционирования линии или требующие малых затрат времени на восстановление ее работоспособности. Для анализа отказов их обычно делят на категории по системам или по признакам, к которым приводит отказ. Такие испытания дают информацию об отказах сложной системы за сравнительно короткий промежуток времени и их часто отождествляют с испытанием на надежность. Чтобы ответить, насколько правомочно такое утверждение, необходимо проанализировать характер отказов, возникающих в сравнительно короткие промежутки времени.

Отказы, для которых наработка (срок службы) значительно ниже ресурса изделия, могут относиться к следующим категориям.

1. Недопустимые отказы, которые возникли в результате конструктивных ошибок, непредвиденных условий эксплуатации или ненадежности технологического процесса изготовления и сборки данного изделия (например, поломки и заклинивание механизмов, повышенное трение из-за неподачи смазки).

2. Отказы, которые возникли в результате взаимодействия элементов сложной системы, когда взаимосвязи

не были выявлены при испытании или расчете отдельных элементов и механизмов системы (например, влияние тепла, выделяющегося при работе гидроагрегата, на точность работы механизма загрузки или фиксации).

3. Отказы, последствия которых легко устранимы и восстановление работоспособности может быть осуществлено в процессе эксплуатации изделия (например, смена режущего инструмента).

4. Отказы, которые не должны иметь место в период работы изделия до очередного ремонта или в течение установленного ресурса, но возникновение которых допускается регламентированным значением вероятности безотказной работы.

Отказы первой и второй категорий характерны для периода освоения новой продукции, они носят временный характер и должны быть сведены к минимуму или ликвидированы вообще. Их отсутствие является показателем совершенства этапов проектирования и производства изделия.

Отказы третьей категории допустимы по условиям эксплуатации и не определяют надежности всего изделия или сложной системы. Отказы четвертой категории составляют малую долю среди всех видов отказов, поскольку требования к безотказности работы современных систем достаточно высоки. Если же их уровень превосходит регламентированное значение, они должны быть отнесены к первой категории. Таким образом, основное число отказов связано с несовершенством станка или линии станков с позиций надежности и отражает период освоения. Наличие этих отказов является сигналом для проведения мероприятий по их ликвидации. Основные принципы потери станком работоспособности из-за медленно протекающих процессов старения остались при таких испытаниях невыясненными, а показатели надежности неизвестными. Поэтому испытания по оценке параметра потока отказов являются необходимым, но не достаточным этапом по определению показателей надежности сложных систем. Главная проблема по испытанию на надежность сложных систем — определить изменение их выходных параметров за период длительной эксплуатации.

§ 4. Связь системы ремонта станка с его надежностью

Параметры системы ППР (см. гл. 13) непосредственно связаны с показателями надежности станка. Ресурс по точности станка определяет, как правило, потребность в капитальном ремонте, а межремонтный период T_0 зависит от сроков службы деталей и элементов станка. Однако решение о включении данной детали в тот или иной ремонт осложняется тем, что возникает рассеяние сроков службы, которое приводит либо к недоиспользованию потенциальной долговечности детали, либо к возрастанию вероятности отказа в межремонтный период.

Фактический срок службы T_{ϕ} должен быть кратным межремонтному периоду T_0 , т. е. $T_{\phi} = KT_0$ (назначенный ресурс детали, изделия), так как восстановление детали планируется при текущем ремонте. В зависимости от рассеяния сроков службы детали при среднем сроке службы T_{cp} , большем чем период до n -го планового ремонта (т. е. $T_{cp} > nT_0$), могут иметь место следующие варианты назначения T_{ϕ} (рис. 150).

1 вариант. Ремонт данной детали осуществляют при n -м плановом ремонте, т. е. назначается $T_{\phi 1} = nT_0$. При этом имеется некоторая вероятность α отказа детали до наступления n -го ремонта. Если отказ наступил до планового ремонта, то деталь ремонтируют или заменяют при межремонтном обслуживании. Такой вариант обычно целесообразен, если вероятность α невелика, т. е. вероятность безотказной работы β находится в допустимых пределах.

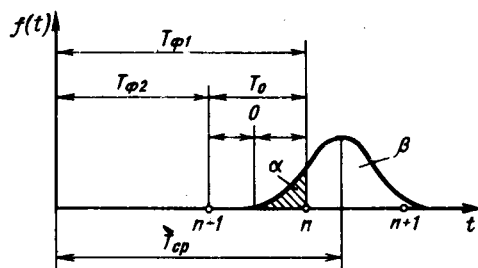


Рис. 150. Влияние рассеяния сроков службы на содержание ремонтных работ

2 вариант. Ремонт детали осуществляют при $(n-1)$ -м ремонте, т. е. $T_{\phi 2} = (n-1)T_0$. В этом случае обеспечивается высокая безотказность изделия, однако имеет место значительное недоиспользование ее сроков службы, так как $T_{\phi 2} \ll T_{\text{ср}}$.

3 вариант. При $(n-1)$ -м ремонте контролируют степени повреждения данной детали и дают заключение о возможности ее безотказной работы в течение последующего межремонтного периода. Диагностику можно осуществлять также во время специально запланированного осмотра O . В зависимости от результатов контроля ремонт детали осуществляют при $(n-1)$ -м или при n -м ремонте.

Данный вариант обеспечивает наибольшее использование потенциально-го срока службы детали с одновременной гарантией высокой безотказности работы изделия. Однако он требует дополнительных затрат на диагностику, знания основных причин потери изделием работоспособности и наличия методов и технических средств для обнаружения и оценки степени повреждения изделия.

Выбор того или иного варианта производят на основе анализа ремонтных потерь и требований безотказности. Таким образом, для каждой детали станка устанавливают, при каком текущем ремонте ее должны ремонтировать (т. е. назначают ее фактический срок службы), и это определяет объем всех ремонтных работ как периодических, так и межремонтного оборудования.

Методы установления потребности

в ремонте данного элемента станка открывают возможность проведения ремонта по техническому состоянию машины, когда объемы и содержание ремонтных работ каждый раз устанавливают или корректируют в соответствии с действительными потребностями.

Следует иметь в виду, что необходимо определять объемы ремонтных работ и назначать фактические сроки службы деталей вне зависимости от того, насколько известны средние значения и дисперсия сроков службы. Поэтому, если отсутствует информация о надежности элементов изделия, будет существовать либо большое недоиспользование сроков службы (для гарантии ремонтируют значительно чаще, чем это необходимо), либо повышенная вероятность отказа изделия в межремонтный период. И то и другое приведет к дополнительным затратам.

Чем достовернее информация о сроках службы элементов, тем больше возможностей для использования надежности, заложенной при конструировании машины. Система ремонта должна в максимальной степени отвечать реальной потребности станка в восстановлении его работоспособности.

§ 5. Источники информации о надежности станков

Для оценки надежности станка необходимо использовать различные источники информации, начиная с этапа проектирования и до окончания эксплуатации (рис. 151). При проектиро-

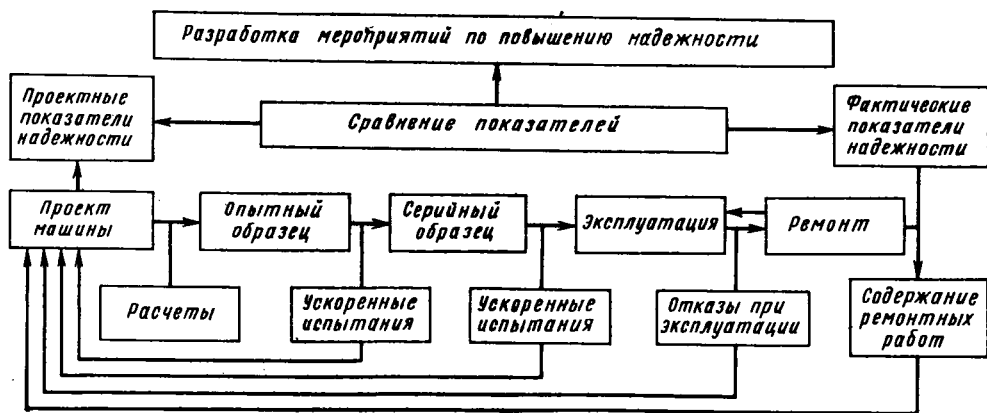


Рис. 151. Источники информации о надежности станков

вании станка и на основании данных готового проекта информацию о надежности можно получить лишь расчетом. Именно качество и достоверность расчетов позволят уже на стадии проектирования заложить в конструкцию необходимый уровень надежности станка. Когда создан опытный образец станка, становится возможным его испытание на стенде или в эксплуатационных условиях. Для оценки надежности эти испытания, как правило, должны быть ускоренными, так как их результаты необходимо использовать для внесения соответствующих исправлений в проект. То же можно сказать и об испытании серийного образца машины перед его запуском в производство.

Далее, после некоторого периода эксплуатации серийных станков начинает поступать информация о возникающих отказах, которые являются следствием недостатков конструкции, допущенных из-за различия между реальными условиями эксплуатации и условиями ускоренных испытаний и из-за несовершенства методов расчета.

Когда станок проходит запланированные виды ремонта, то содержание ремонтных работ (сроки службы отдельных элементов станка, трудоем-

кость их ремонта, мероприятия, связанные с контролем и восстановлением выходных параметров машины, и др.) является тем источником информации, который позволяет судить о надежности станка и его элементов.

Статистические данные о сроках службы элементов станка в процессе его эксплуатации и ремонта позволяют определить показатели надежности для данной модели с учетом различных режимов работы и условий ее эксплуатации и могут быть использованы при проектировании новых станков.

Основной недостаток статистических исследований заключается в необходимости иметь достаточное число станков, работающих длительное время. Результаты исследований часто трудно применить на этапе проектирования, так как новый станок имеет иные параметры, чем тот, о котором собран статистический материал. Основа для оценки надежности станков на стадии их проектирования и при наличии опытных образцов — изучение процессов, которые изменяют начальные параметры станка (износа, усталости, коррозии) и применение методов прогнозирования потери станком работоспособности в предполагаемых условиях эксплуатации.

Глава **21** **Общественное производство и эстетизация промышленной среды**

§ 1. Развитие производства и художественного конструирования (дизайна)

Главной движущей силой технического прогресса было и есть стремление создавать более производительные, надежные, долговечные, экономичные средства производства. Создавая средства производства, человек стремится сделать их максимально удобными и красивыми, так как стремление к красоте неотделимо от человека. Поэтому в процессе развития производительных сил эстетизация предметной среды приобретает все большее и большее значение.

Эстетический облик изделия стал атрибутом современной промышленной продукции. Создание изделия, отвечающего современным требованиям, предполагает тесное сотрудничество инженера и художника-конструктора. Их деятельность в сфере технической эстетики призвана облагораживать предметную среду и процесс труда, благотворно влиять на повышение производительности труда.

Художественное конструирование есть метод разработки промышленных изделий на основе технической эстетики и эргономики. Эти изделия должны отвечать следующим требованиям: функциональности, удобству обслуживания, эстетичности, доступной стоимости, и вписываться в окружающую среду.

Задачей настоящего раздела является изучение основных закономерностей технической эстетики, эргономики и метода художественного конструирования. Инженер-конструктор должен профессионально грамотно говорить с

художником-конструктором и в содружестве с ним создавать промышленную продукцию.

Совершенствование технологических процессов, создание высокопроизводительного оборудования, высокий уровень организации производства дали возможность выпускать большое количество продукции. Практика сбыта показала, что продукция, обладающая эстетическими качествами, имеет больший спрос, чем продукция менее изящная и красивая. Новый предметный мир формирует и новые эстетические взгляды людей на него и вызывает потребность в продукции с эстетическими достоинствами.

Социальная сущность технической эстетики как науки в художественном конструировании определяется тем, что она служит интересам общества, главным образом его господствующих классов. Поэтому роль технической эстетики в социалистическом и капиталистическом обществах различна. В буржуазном обществе сфера влияния технической эстетики весьма велика при художественном конструировании товаров широкого потребления и мала — при эстетизации производственной среды. Капиталист делает затраты на эстетизацию только в том случае, если получает дополнительную прибыль.

Другие социальные задачи стоят перед технической эстетикой в социалистическом обществе. Законы технической эстетики при социализме широко распространяются на производственную и бытовую среду, орудия труда, средства транспорта, товары народного потребления. Благодаря этому техническая эстетика оказывает влияние на развитие социалистических

производственных отношений и эстетическое воспитание нового человека. Отличительной чертой художественного конструирования в условиях социализма является его гуманизм: оно призвано на службу человеку — вносить в жизнь красоту, доставлять людям радость, создавать гармонию между человеком и окружающим его предметным миром. Рабочие, при социализме гордятся, если изделия их предприятия отвечают современным требованиям качества. Выпуск красивых вещей капиталистическими предприятиями не радует рабочих, производящих их, потому что результаты их труда присваиваются капиталистом.

В 1919—1920 гг. в Советской России и Германии почти одновременно возникли две организации — ВХУТЕМАС в Москве и «Баухауз» в Веймаре — два центра художественного конструирования, умело сочетавшие теоретическую, педагогическую и практическую деятельность [16].

Теоретические поиски тех лет явились важной вехой в истории дизайна, так и в истории эстетической мысли в целом. В 1920 г. В. И. Ленин подписал Декрет Совнаркома об организации в Москве Высших государственных художественно-технических мастерских (ВХУТЕМАС), готовящих художников-мастеров. Выпускники ВХУТЕМАСа должны были повысить эстетический уровень рабочих и качество промышленных изделий и производственной среды, чтобы человек получал радость и от процесса труда, и от окружающей его производственной обстановки.

В 1962 г. Совет Министров СССР издал постановление «Об улучшении качества продукции машиностроения и товаров культурно-бытового назначения путем внедрения методов художественного конструирования». В 1967 г. Комитет стандартов принял решение [16] о государственной аттестации качества серийной и массовой продукции и Знаке качества (рис. 152), который присуждают за высокие технические, экономические и эстетические показатели. Он состоит из пятиугольного контура, внутри которого — изображение весов, символизирующих одну из основных идей стандартизации: измерение, соответствие эталону.

Рис. 152. Знак качества



Иногда техническую эстетику и художественное конструирование обозначают английским термином дизайн, имеющим несколько значений: инженерное и художественное конструирование, систему теоретических взглядов в этой области, результаты творчества художника-конструктора и метод его работы. Производное от слова дизайн — дизайнер означает художник-конструктор.

В дизайне можно отметить следующие направления: истинный дизайн, функционализм, стилизация, стайлинг.

Истинный дизайн — это создание изделия на основе эргономики, функционального и композиционного анализ, передовых технических требований. Форма изделия в этом случае наиболее точно отображает его практическое назначение (функцию). В целом изделие всесторонне и лучшим образом удовлетворяет потребности человека. При производстве нового изделия истинного дизайна используют передовую технологию и оборудование наиболее совершенной конструкции.

Функционализм — формообразование изделия на основе совершенствования функции, т. е. в основе создания изделия прежде всего лежит отработка функции, которой отдается предпочтение перед формой.

Стилизация — конструирование внешнего вида нового изделия по существующему образцу. Стилизация способствует распространению современных форм изделий и модернизации производства.

Стайлинг — конструирование изделий, отличающихся от своих аналогов лишь внешним видом. Постоянная модернизация изделия не вызывает существенной модернизации производства. Стайлинг — конъюнктурное орудие получения сверхприбыли, порочный вид дизайна.

Из рассмотренных видов дизайна

следует стремиться к истинному дизайну. Кроме того, возможно применение стилизации, так как существует обмен лучшими промышленными образцами изделий между государствами и копирование их.

§ 2. Эргономика

Эргономика — это наука, изучающая взаимосвязи и взаимодействия человека с машиной и окружающей его предметной средой в процессе труда. Слово эргономика образовано из двух греческих слов: эргос — работа, номос — закон; в дословном переводе обозначает «закон о труде». Эргономика как наука представляет собой совокупность антропологических, психологических, физиологических, гигиенических, технических и производственных понятий. Эргономика развивает комплексный взгляд на отношение человека к технике и учит использованию психофизиологических характеристик человека при конструировании. Эргономика способствует правильной разработке структуры изделия и интерьера.

Основные разделы эргономики: антропометрия, инженерная психология, физиология, гигиена труда.

Антропометрия — измерение тела человека. Антропометрические данные кладут в основу проектирования машин, орудий труда, помещений, потребительских изделий, что делает возможным правильную и эффективную эксплуатацию этих предметов. При использовании антропометрических данных требуется творческий подход в каждом случае. Например, высоту центров токарно-винторезных станков при проектировании их для других стран нельзя выбирать по среднему росту людей Советского Союза, так как средний рост людей на земном шаре колеблется в пределах от 1410 до 1820 мм. На рис. 153 показаны основные антропометрические точки. Ниже, в табл. 13 приведены основные антропометрические данные мужчин и женщин в возрасте от 20 до 59 лет.

При проектировании станков, машин, средств транспорта, приборов, интерьеров для Советского Союза конструктор и художник-конструктор должны базироваться на данных табл. 13.

При создании изделий, интерьера и в целом предметной среды кроме антропометрических данных следует также учитывать состав и возрастную изменчивость организма человека, так

Таблица 13

Средние антропометрические данные мужчин и женщин (рис. 153)

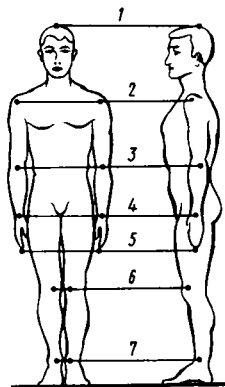


Рис. 153. Основные антропометрические точки: 1 — вершечная (высшая точка темени при постановке головы в такое положение, когда наружный угол глаза и слуховой проход ушной раковины находятся на одном горизонтальном уровне); 2 — плечевая (наиболее выступающая в статич. точке бокового края окрестного отрезка плеча); 3 — локтевая (верхняя точка головки локтевой кости с наружной стороны); 4 — запястная (самая низкая точка на шиловидном отростке локтевой кости со стороны первого пальца); 5 — средняя (конечная точка мякоти третьего пальца руки); 6 — верхнеберцовая внутренняя (самая высокая точка внутреннего края мышцы большой берцовой кости); 7 — нижнеберцовая внутренняя (самая нижняя точка на кончике внутренней лодыжки)

Антропометрическая точка	Показатель	Размер, мм	
		Мужчины	Женщины
1	Рост	1680	1560
2	Высота плечевой точки	1360	1270
3	Высота локтевой точки	1040	980
4	Высота шиловидной точки	800	750
5	Высота пальцевой точки	610	580
6	Высота верхнеберцовой точки	450	410
—	Высота нижнеберцовой точки	70	60
—	Высота седьмого шейного позвонка над плоскостью сиденья	640	600
—	Длина туловища	500	480
—	Длина плеча	320	290
—	Длина предплечья	250	230
—	Длина кисти	180	170
—	Длина руки	750	690
—	Длина ноги	900	840
—	Длина бедра	450	430
—	Длина голени	380	340

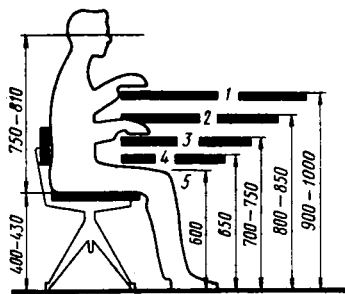


Рис. 154. Размерные соотношения в вертикальной плоскости при работе сидя

как рабочие коллективы могут отличаться по составу (женщины и мужчины) и возрасту. В транзисторных сборочных цехах, например, работают преимущественно женщины молодого возраста, а в автомобильных сборочных цехах — мужчины среднего возраста. Поэтому при создании оборудования и интерьера цеха должно учитываться различие в росте женщины и мужчины, а также в цвете окраски интерьера: для молодежи — яркие, для пожилых — спокойные тона.

При проектировании нового оборудования и модернизации действующего следует базироваться на анатомической структуре тела, допустимых нагрузках на руки и ноги, на скорости их движения, учитывать допустимые нагрузки на органы чувств и скорость реагирования нервной системы на информацию.

На рис. 154 даны размерные соотношения при работе сидя [28]. Высота рабочей поверхности стола или машины зависит от характера работы и естес-

венного положения рук, головы, туловища и ног при работе. При выполнении тонкой работы, например сборки часов, требуется большая концентрация внимания, зрения и точность движения рук с инструментом. Это достигается упором рук на поверхность стола и приближением собираемого объекта к глазам. Для выполнения таких работ стол 1 имеет высоту 900—1000 мм. Высота рабочей поверхности машины, например стола 2 пресса, равна 800—850 мм. Такая высота увеличивает зоны движения рук, на нем удобнее производить работы, связанные с подачей заготовок в рабочую зону. При выборе высоты стола для пишущей машинки 4 учитывают ее высоту и положение рук при печатании (650 мм). Минимальный проем стола 5 для ног 600 мм, а высота сиденья 400—430 мм.

На рис. 155 показаны размерные соотношения при работе стоя. На рис. 155, а показаны зоны удобства работы и сопоставления их с высотой от пола до центров токарного станка 2. Зона высоты токарного станка 1 заштрихована. Сопоставление показывает, что высота центров (1150 мм) и лучевая точка (1040 мм) находятся в удобной зоне. Положение руки в удобной зоне способствует оптимальному физиологическому состоянию руки, и человек меньше утомляется.

Конструктор, разрабатывая металлорежущие станки (токарной группы), должен выбирать высоту центров от пола в зоне 1 (см. рис. 155, а, б). На рис. 155, б дано сопоставление среднего роста мужчин Советского Союза и племени пигмеев Африки.

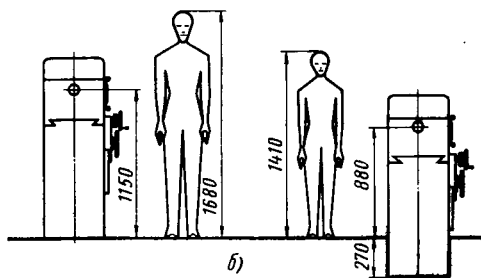
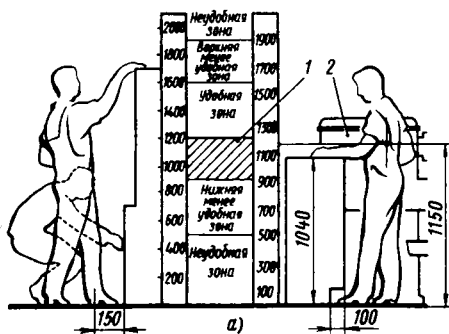


Рис. 155. Размерные соотношения при работе стоя:

а — зоны удобства работы; б — средний рост человека и высота центров станка

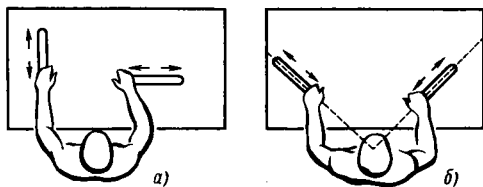


Рис. 156. Направление движения рук:

а — неудобное; б — удобное

Токарный станок для использования в Советском Союзе имеет высоту центров 1150 мм, которые находятся примерно на высоте лучевой точки (1040 мм; см. табл. 13) в удобной зоне (рис. 155, а). Для создания этих же условий для человека с ростом 1410 мм потребуется опустить станок ниже пола на 270 мм, или сделать подставки для ног высотой 270 мм.

При конструировании рабочего места необходимо предусматривать плавность и закругленность в траектории рабочих движений; наименьшее число физиологически неудобных движений работающего; равномерность распределения работы между правой и левой руками, участие в работе предплечья, кисти и пальцев рук; разнообразие движений, что особенно важно при силовых работах.

Одним из положений эргономики является требование экономии движений: 1) при одновременном движении руки должны, по возможности, одновременно начинать и заканчивать действие и выполнять одну операцию; 2) движения руками должны быть симметричны и противоположны по направлению; 3) движения должны совершаться в пределах поля зрения; 4) ритмичность должна предусматривать свободный ритм движения в отличие от вынужденного, обусловленного машиной.

На рис. 156 показаны две схемы движения рук. Каждое движение должно заканчиваться в положении, удобном для начала следующего движения, т. е. должна соблюдаться естественность движений.

Четкость и безошибочность включения и выключения машины и ее механизмов обеспечивается соблюдением

конструктором mnemonicского правила и принятых условностей при выборе направления движения органов управления. Мнемоника — совокупность приемов, имеющих целью облегчить запоминание возможно большего числа сведений, фактов; основана главным образом на законах ассоциаций.

Данные эргономики позволяют сделать следующие рекомендации по выбору скорости и направлению движений при проектировании нового и модернизации действующего оборудования: 1) если требуется быстрая реакция, то лучше использовать движение «к себе»; 2) в горизонтальной плоскости скорость рук больше, чем в вертикальной; 3) скорость движения правой руки «слева направо» больше, чем в обратном направлении; 4) вращательное движение в 1,5 раза быстрее поступательного; 5) при движении «толчком» с последующим замедлением скорости затрата сил меньше.

Если инженер-конструктор проектирует станок с постом управления, то для органов управления, приводимых в движение рукой, максимальное усилие должно быть 40 Н для руки и 10—20 Н для пальца. У нас в стране применяются санитарные правила организации технологических процессов и гигиенические требования к производственному оборудованию, которые должен учитывать проектировщик технологического оборудования.

§ 3. Инженерная психология

Инженерная психология есть ветвь эргономики и является специальной отраслью психологии труда, изучающей взаимосвязь человека и техники и их взаимодействие. Инженерная психология органически связана с конструированием и эксплуатацией машин и дает основу для выбора лучшей ее структуры. Следовательно, задачи инженерной психологии — изучить возможности работы человека и машины и оптимально распределить функции между ними и, таким образом, обеспечить наилучшие условия и результаты труда.

В инженерной психологии большое внимание уделяется изучению взаимосвязей и взаимодействия системы человек — машина. В социалистических

Предельные углы отклонения и обзора глаза

Предельный угол, °	Направление движения глазного яблока			
	Вверх	Наружу	Вниз	Внутрь
Отклонение	37	43,5	53	46
Обзор	50—60	94—105	70—75	60—62

эффективной видимости, находящейся в пределах угла 30° , обеспечивается довольно четкая видимость при напряженном внимании.

В вертикальной плоскости (рис. 157, а) зона обзора без поворота головы равна 86° , а с поворотом — 130° . В горизонтальной плоскости (рис. 157, в) зона обзора без поворота головы равна 120° , а с поворотом — 225° .

В табл. 14 приведены предельные углы поворота глазного яблока и соответствующие им углы обзора.

С развитием техники изменяются условия труда. Механизация и автоматизация приводят к необходимости управлять большим числом одновременно работающих объектов, например автоматической линией. Между органами чувств оператора и объектом включена сложная система автоматического управления, передающего информацию посту управления. Возрастают требования к скорости действий оператора, что обусловлено повышением скоростей управляемых процессов. При конструировании органов управления в технических устройствах необходимо базироваться на психофизиологии человека.

Виды индикации, с помощью которых передается информация от машины к человеку, весьма разнообразны: показания стрелочных приборов счетчиков, радиолокационные и телевизионные изображения, набор условных знаков, цифр, букв, акустические сигналы.

Так как эффективность работы человека зависит от совершенства и точности принимаемой информации, вопрос о психологических принципах конструирования индикаторов стал центральным вопросом инженерной психологии. Качество приборов информации оценивают по скорости и точности их читае-

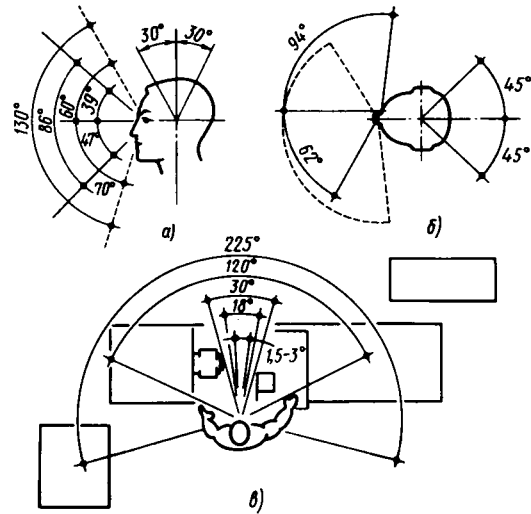


Рис. 157. Размеры зрительного поля человека (бинокулярное зрение):

а — пределы обзора в вертикальной плоскости; б — пределы обзора правого и левого глаза в горизонтальной плоскости; в — зона зрения и пределы обзора в горизонтальной плоскости; 30° и 45° — углы свободно поворота головы

странах в системе человек — машина в первую очередь учитывают человеческий фактор (удобство в эксплуатации), нормальный темп рабочих движений, допустимые нагрузки на органы управления. Поэтому инженерную психологию иногда называют наукой о человеческом факторе.

Художнику-конструктору и инженеру-конструктору необходимо знать границы и основные зоны зрительного поля, чтобы правильно компоновать пост управления, т. е. правильно расположить сигнализаторы, индикаторы, кнопочные станции и другую аппаратуру.

Зрительное поле человека делят на несколько зон (рис. 157) [9, 16]. Зона центрального зрения лежит в пределах $1,5-3^\circ$. Здесь обеспечивается наиболее четкая видимость, что обусловлено расположением желтого пятна — наиболее чувствительного участка сетчатки. Зона мгновенного зрения равна 18° и определяется максимальной величиной скачка глаза в процессе его движения. В этом угловом пространстве зрительное восприятие производится в ограниченное время. В зоне

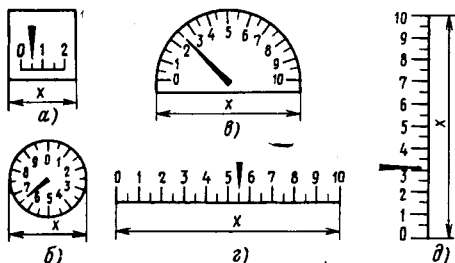


Рис. 158. Формы шкал:

а — «открытое окно»; б — круговая; в — полукруговая; г — горизонтальная; д — вертикальная; х — размер шкалы

мости, что достигается выбором формы и размера шкал, дистанции, экспозиции считывания.

Линейные шкалы, горизонтальные и вертикальные, относятся к категории одномерных стимулов (приборов). Ориентация глаз при считывании линейных шкал производится по положению стрелки относительно начальной и конечной точек шкалы.

Круговые и полукруговые шкалы относятся к категории двухмерных стимулов — ориентация глаз производится по положению стрелки относительно начальной и конечной точек шкалы и по ее наклону.

В стрелочных индикаторах наиболее точно читаются показания счетчиков типа «открытое окно», затем — круговых, полукруговых, прямолинейных — горизонтальных и вертикальных (рис. 158). Зависимость точности считывания от формы шкалы приведена в табл. 15.

Таблица 15

Влияние формы шкалы на точность считывания цифровой индикации

Шкала (рис. 158)					
Параметр	а	б	в	г	д
Максимальный размер х, мм	42	55	110	178	178
Ошибка считывания шкалы, % . .	0,5	10,9	16,6	27,0	35,5

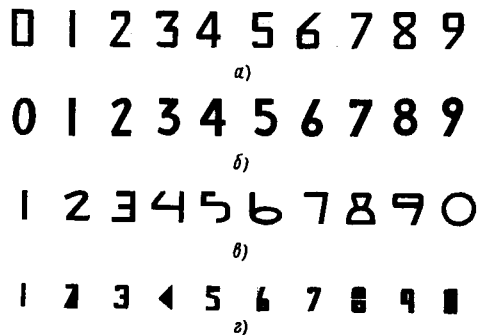


Рис. 159. Типы начертания цифр

Наиболее точное считывание у счетчиков «открытое окно» (рис. 158, а), потому что цифровая индикация, нанесенная на шкалу, перемещается относительно неподвижного штриха, и считывание цифр происходит без поворота глаз, что уменьшает их усталость. Наибольшие ошибки считывания с прямолинейных вертикальных шкал, так как при считывании необходим поворот глаз для отсчета от исходной цифры к конечной (имеет место одномерный стимул).

Большое влияние на точность считывания информации при знаковой индикации оказывает форма начертания цифр и букв. Более точно считывается начертание цифр, образованных прямыми линиями (1, 7, 4) и менее точно — имеющих округлое начертание (0, 9, 5, 6, 8). Это привело к новому начертанию цифр, например, начертания Бергера (рис. 159, а), Макворта (рис. 159, б), Слейта (рис. 159, в), Лансделла (рис. 159, г). Меньшее число ошибок при считывании дает шрифт Лансделла, но он сложен в написании.

§ 4. Художественно-конструкторский анализ и задание на проектирование

Обязательным условием создания изделий, отвечающих современным техническим и эстетическим требованиям, является художественно-конструктор-

ский анализ. Этот анализ включает следующие основные этапы [16, 48].

1. Сбор информации, в процессе которого выявляются новейшие данные об аналогах создаваемых изделий, по ним можно было бы представить их конструкцию и эксплуатационные качества.

2. Подбор действующих аналогов. Его следует производить по сходству типов и назначения, мощности, точности и других параметров.

3. Изучение функциональных достоинств изделий. Сначала необходимо проанализировать процесс эксплуатации изделия, определить его стадии, затем выявить оптимальные условия и выработать требования, которым должно удовлетворять идеальное изделие, т. е. изделие, обладающее наилучшими функциональными и эстетическими качествами. Основное требование — это учет «человеческого фактора», т. е. всего, что определяет удобство пользования изделием, степень совершенства связей человек — предмет или человек — машина.

Для разных изделий понятие «удобство пользования» не одинаково. В одних случаях необходимо обратить внимание на уровень шума, возникающего при работе машины, на форму органов управления, читаемость цифр на индикаторах, в других — на высоту сидения при работе сидя, высоту центров станка при работе стоя.

Для оценки функциональных достоинств характеристики изделия целесообразно разделить на две группы: 1) полученные при измерении, испытании; 2) оцененные при непосредственном участии человека как дополнительного объекта анализа.

В анализе важно выявить связи изделие — среда. Оценивая функциональные достоинства изделия, необходимо учитывать, что высшей оценки заслуживает изделие, умеющее соседствовать с другими предметами, т. е. способность его формы и стиливой направленности вписываться в интерьер.

4. Анализ соответствия материала выполняемой им функции. Выбор материалов для деталей машин и других изделий, несущих нагрузки, производит инженер-конструктор, который решает эту задачу на основе теории

прочности и эксплуатационных характеристик изделия. Материал должен обеспечивать прочность, жесткость, износостойкость и оптимальные габаритные размеры конструкции. Высшей оценки заслуживают изделия, требующие минимальных декоративных средств, поэтому художник-конструктор должен стремиться максимально использовать декоративные свойства самих материалов.

5. Завершающим этапом анализа является рассмотрение композиционных особенностей формы, ее художественной и образной выразительности. Форма должна выражать функцию и рождаться на ее основе, обладать тектонической правдивостью: легкое должно выявляться как легкое, тяжелое не нужно маскировать под легкое: динамическая форма в статическом изделии лишает его образности.

Основным критерием оценки композиции формы является целостность. Добиваясь ее, необходимо обращать внимание на пропорциональность, композиционный центр и соподчинение отдельных элементов главному, на масштабность и ритмичность элементов формы, уметь использовать тождество, нюанс, контраст и цветовую гармонию. Если художник-конструктор решает вопрос совместно с другими специалистами, то композиционные вопросы он должен решать самостоятельно и профессионально грамотно.

На трудоемкость изготовления и себестоимость изделия большое влияние оказывает его технологичность, поэтому художник-конструктор должен консультироваться с технологом и инженером-конструктором.

Последовательность анализа может быть нарушена отсутствием материалов по аналогам, несинхронностью работы художника-конструктора и инженера-конструктора.

Процесс анализа наглядно раскрывается в фотографиях, рисунках, таблицах. В случае необходимости пояснения и уточнения принципа работы или формы детали или всего изделия делают сечения и разрезы. Функциональные качества изделий могут быть отражены в специальной таблице, включающей весь процесс эксплуатации изделия.

§ 1. Композиция

Композиция — это построение конструируемого объекта, расположение и взаимосвязь его частей, обусловленные его назначением. Одним из условий возникновения художественных качеств формы является пространственное единство всех ее элементов, создающее целостное восприятие формы.

Пространственное единство формы достигается следующими закономерностями: отношениями, пропорциями и ритмом всех элементов (линий, поверхностей, фактуры, массы, цвета), образующих форму.

Закономерности архитектуры следует рассматривать как исходные для разработки композиции машин и других промышленных изделий, так как архитектурные объекты (здания) неподвижны и свою первоначальную форму сохраняют постоянно. Во многих металлорежущих станках (строгальных, шлифовальных, токарно-винторезных и др.) детали перемещаются относительно друг друга, вследствие чего нарушается исходная композиция. Поэтому при проработке композиции необходимо учитывать перераспределение масс (частей), т. е. исходные и конечные положения их во время рабочего и холостого ходов и состояния покоя.

В архитектуре создан метод членения архитектурно-пространственных форм в определенных закономерных отношениях, с помощью которых достигается пространственное единство этих

форм [14, 16, 24]. Членение может быть горизонтальным (параллельно горизонтальной координате) и вертикальным (параллельно вертикальной координате). Членение поверхности может быть произведено прямолинейной полоской, выполненной на поверхности (рис. 160, а), или различными фактурой, цветом, плотностью массы, образующими разделительную линию на поверхности. На рис. 160, б показано членение поверхности различной фактурой. В первом случае элементом, членящим поверхность, может быть линейный рельеф, выступающий или углубленный (рис. 160, в, г), например, карниз, борозда. На фасаде эти линейные членения выражаются как непрерывные или прерывные, они создают у зрителя представление о характере полных членений. Во втором случае членение поверхности произведено приближением или отдалением одной части по отношению к зрителю (рис. 160, д, е) или поворотом расчлененных частей поверхности относительно друг друга (рис. 160, ж), где верхняя часть наклонена, нижняя часть вертикальна; сочетанием части поверхности различного геометрического вида, например поверхности цилиндрического сечения (внизу) и плоскости (вверху) (рис. 160, з).

В машиностроении применяют членение формы (деталей) канавками (рис. 161, а), выступающими полосками (рис. 161, б). На рис. 162 показан притирочный станок, у которого с декоративной целью произведено членение станины и корыта горизонтальными

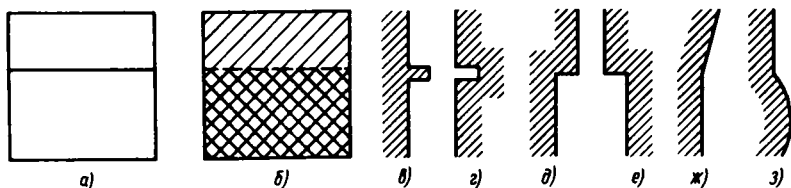


Рис. 160. Способы членения фронтальной поверхности архитектурных объектов

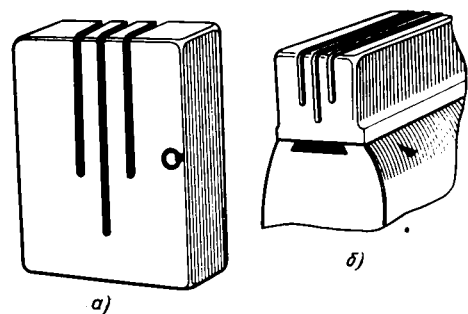


Рис. 161. Членение станочных корпусных деталей

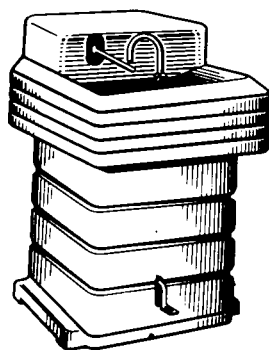


Рис. 162. Притирочный станок, расчлененный прорезями

прорезями. Отсутствие при членении правильных пропорций ухудшило эстетический вид станка. Станина и корыто «дробятся», станок не воспринимается как художественно-организованная форма — она нефункциональна. Декоративные прорези усложняют технологию изготовления моделей, отливок, механическую обработку и окраску станины и корыта. При эксплуатации станка прорези загрязняются, очистка их неудобна.

Членение в машиностроении вызвано в первую очередь необходимостью выполнения сопряжений корпусных деталей — станин, стоек, траверс, коробок скоростей, предохранительных кожухов, крышек.

На рис. 163, а, б показана форма буртиков, которая затрудняет обработку и сопряжение их в одной плоскости, так как требуется опиловка буртиков по всему контуру детали. Особенно трудно обрабатывать сферические профили (рис. 163, б). Более выгодна конструкция сопряжения с одним буртиком (рис. 163, в), который делает размерные отклонения сопрягаемых деталей незаметными. Хорошими декоративными свойствами обладает сопряжение, показанное на рис. 163, г. Паз, образованный сужением верхней детали в месте сопряжения, делает размерные отклонения также незаметными. На рис. 163, д показано сопряжение крышки со станиной и шпиндельной бабкой станка. Получение такого сопряжения связано с большими технологическими трудностями, так как для его получения необходима совмест-

ная обработка станины и шпиндельной бабки в месте их стыка. Такой стык декоративен, тонкие членящие линии в нем не дробят форму. Его недостаток состоит в сложности обработки.

Отношения, возникающие при членении поверхностей и объемов формы, позволяют выразить ряд ее свойств: масштабность, статичность, динамику, тяжесть и легкость. Отношения являются средством гармонизации формы.

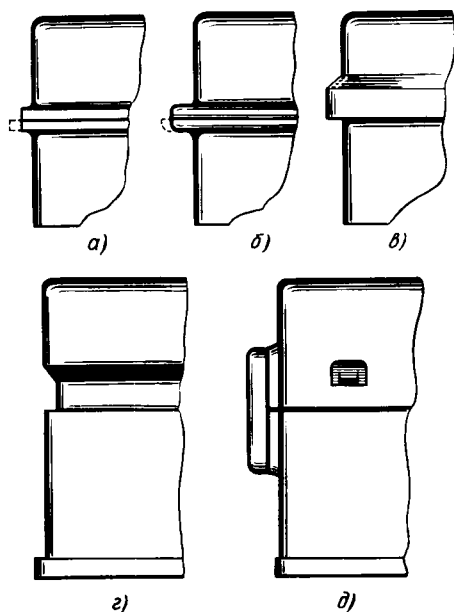


Рис. 163. Способы сопряжения литых деталей металлорежущих станков и формы декоративных буртиков и прорезей

Их делят на простые и иррациональные. Простые отношения выражаются условно дробью, у которой числитель и знаменатель — целые числа в пределах от 1 до 6.

В простейшем отношении строят квадрат (1×1) и куб ($1 \times 1 \times 1$). В кратных отношениях — 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 — меньшая величина служит единицей измерения — модулем большей величины.

Простые отношения — 2:3, 3:4, 2:5, 3:5, 4:5, 5:6 — содержат в себе модуль, укладывающийся целое число раз в каждой величине, входящей в отношение. В простых отношениях проявляется четкая соизмеримость величин, что и лежит в основе их гармонической связи.

К иррациональным отношениям относится «золотое сечение», или «золотая пропорция» [34]. При золотом сечении отрезок — катет AO (рис. 164, б) прямоугольного треугольника AOB , с отношением $1/2$ делится на две части таким образом, что большая часть A_1O (мажор) относится к меньшей AA_1 (минор) как весь отрезок OA относится к OA_1 , т. е.

$$\frac{OA_1}{AA_1} = \frac{OA}{OA_1} = \frac{\sqrt{5} + 1}{2} \approx 1,62.$$

На рис. 164, а показан сверлильный станок, построенный по отношениям «золотого сечения».

Отношения выявляют и другие свойства формы. Если отношения тождественные или нюансные, то характеризуется статичность формы. Тождественными отношениями называют такие, при которых повторяются равные величины 1:1, например поверхности куба (рис. 165, а), образованные равными сторонами. Нюансные — это отношения близких величин или свойств в пределах от 1:1 до 2:1. Контрастные отношения создают динамику — «зрительное движение» формы в направлении преобладающей величины (рис. 165, б, в) (контрастное отношение — это отношение от 2:1 и более). Динамика возникает не только при неравных отношениях в измерениях формы, но и в зависимости от отношений и других свойств, например цветовых. Если два цвета одного тона, но разной насыщенности, то движение будет ощу-

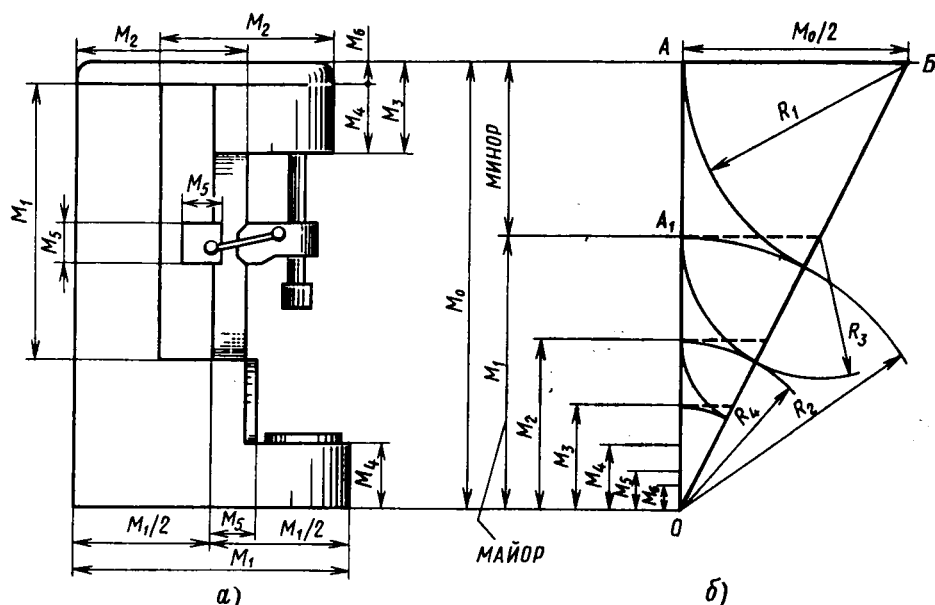


Рис. 164. Методика использования шкалы «золотого сечения» при построении станков: а — сверлильный станок, построенный в отношениях «золотого сечения»; б — шкала «золотого сечения»; R_1 , R_2 — вспомогательные размеры для деления катета OA в отношении «золотого сечения»; R_3 , R_4 — то же, для катета OA_1 и т. д.; M_0 — большой катет треугольника (полная высота станка); M_1 — M_6 — большие отрезки катетов (мажоры); соответствующих подобных треугольников, которые используют при выборе габаритных размеров элементов станка

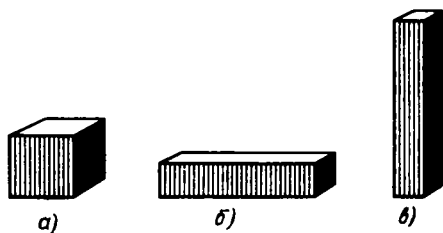


Рис. 165. Состояние формы в зависимости от протяженности её сторон:
а — статичная объемная форма; б, в — динамичные объемные формы

щаться в сторону более насыщенного цвета.

При членении формы по горизонтали и расположении одной массы над другой возникает весовое отношение и необходимость зрительного уравнивания.

При равных членениях форма в весовом отношении инертна, так как отсутствует различие верха и низа (рис. 166, а). В случае неравномерного членения формы по вертикали больший объем, расположенный вверху, имеет больший вес (рис. 166, б), и наоборот (рис. 166, в).

В зависимости от пространственного расположения, протяженности по трем координатам и вида восприятия формы различают три вида композиции: 1) фронтальную (зритель статичен); 2) объемную (зритель движется вокруг формы); 3) глубинно-пространственную (зритель движется в глубину формы) [24]. Архитектурный объект может обладать чертами всех трех видов композиций при доминировании одного из них.

Отличительным признаком фронтальной композиции является построение элементов архитектурно-пространственной формы в их композиционной связи по двум фронтальным координатам — вертикальной и горизонтальной. Построение элементов по глубинной координате имеет во фронтальной композиции подчиненное значение. При фронтальной композиции возможно расчленение массы, создание интервалов (рельефов, заглубленностей центральной массы по отношению к боковым).

На рис. 167 показан гидравлический токарно-револьверный полуавтомат, у которого длина и высота доминируют

над шириной, поэтому его построение относится к фронтальной композиции. Он разработан с учетом эстетических требований и удобен в эксплуатации. Базовые детали (основание, стойка, корыто) вследствие прямолинейности поверхностей, образующих их, технологичны. Композиционным центром является средняя часть станка (стойка), которая подчиняет другие корпусные детали (корыто, шкаф, кожух и др.).

Объемная композиция характеризуется распределением массы по трем координатам и образует трехмерную форму с относительно равными измерениями по всем трем координатам и отличается относительно замкнутой поверхностью. В зависимости от условий окружающей среды объемную композицию можно строить на восприятии с двух и трех сторон. На рис. 168 показан электроэрозийный копировально-прошивной станок объемной композиции.

Глубинно-пространственная композиция — это соотношение архитектурно-пространственных форм (поверхностей, объемов, комплексов, пространств

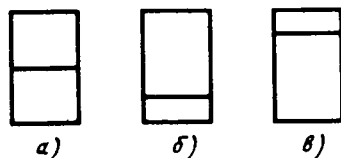


Рис. 166. Весовые отношения при членении формы

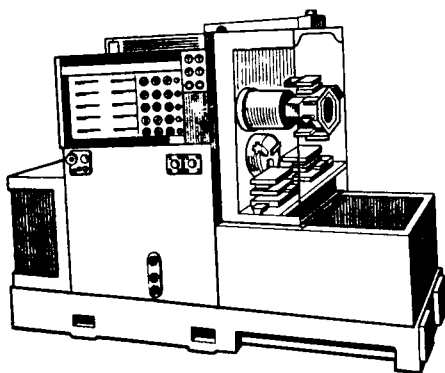


Рис. 167. Гидравлический токарно-револьверный полуавтомат

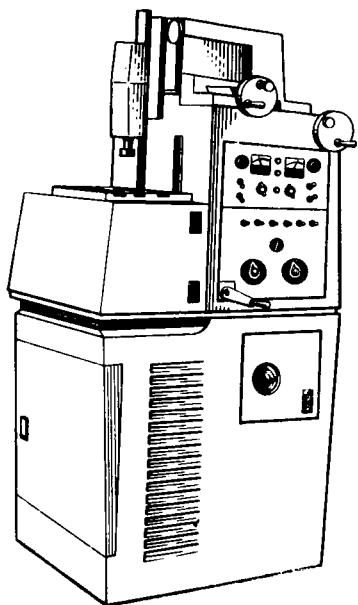


Рис. 168. Электроэрозионный копировально-прошивочный станок объемной композиции

между ними), расположенных по трем координатам и рассчитанных на восприятие при движении человека в глубину. Типичный и доминирующий признак глубинно-пространственной композиции состоит в том, что она определяется не какой-либо одной объемной формой или группой форм, а пространством, образуемым закономерной расстановкой масс (форм). Глубинно-пространственную композицию используют при проектировании открытых и закрытых пространств: промышленных зданий, клубов, спортивных залов, площадей городов.

§ 2. Гармонизация формы станков пропорционированием

Пропорцией называют равенство двух отношений. При разработке конструкции изделий художнику-конструктору приходится решать задачи, связанные с формообразованием. Среди этих задач большое значение имеет выбор выразительных пропорций, позволяющих эстетизировать создаваемое изделие.

Пропорциональная зависимость может быть выражена величинами по одной, двум и трем координатам. В пря-

моугольных плоскостных формах пропорциональная связь выражается отношением высоты и ширины, а в объемных формах — соотношением высоты, ширины и глубины. На рис. 169 показаны прямоугольники с взаимозависимым расположением, определяющим прямую пропорцию. Прямоугольники расположены так, что их диагонали параллельны и отношения их сторон дают прямую пропорцию:

$$\frac{a}{b} = \frac{a'}{b'}.$$

На рис. 170 расположение прямоугольников отлично от первого: их диагонали взаимно перпендикулярны и соотношение сторон дает обратную пропорцию:

$$\frac{a}{b} = \frac{b'}{a'}.$$

Пропорциями как методом построения взаимозависимых пространственных величин пользовались в древние времена, эпоху Возрождения; пользуются ими и в современной архитектуре. В машиностроении пропорции используются для эстетизации формы.

Пропорционирование по принципу геометрического подобия [25] есть про-

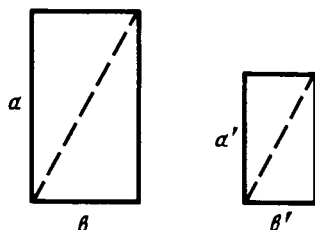


Рис. 169. Прямая пропорция

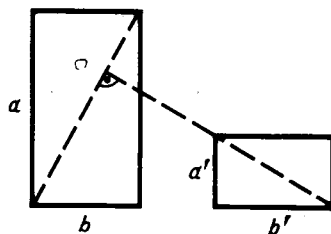


Рис. 170. Обратная пропорция

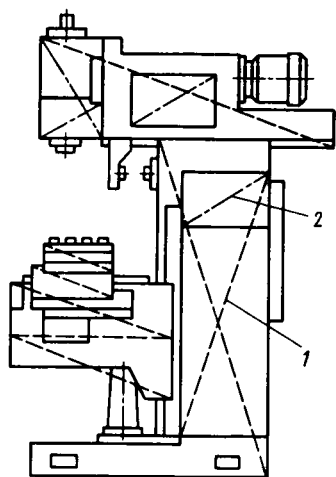


Рис. 171. Графическая схема пропорции элементов консольно-фрезерного станка

цесс проектирования элементов, близких по форме, но различных по величине, составляющих станок или другое технологическое оборудование. Однотипностью конструктивных элементов по форме и правильно найденных пропорциональных соотношений достигается композиционное единство станка, т. е. гармонии формы проектируемого объекта. Иногда размеры частей станка нарушают пропорционирование — нельзя достигнуть параллельность и перпендикулярность диагоналей прямоугольников и создавать несколько систем прямых линий пропорционирования. На рис. 171 показана графическая схема пропорционирования элементов консольно-фрезерного станка с помощью двух систем прямых линий. На основе системы 1 гармонизируются элементы несущей системы станка — станина, консоль со столом, хобот, на основе системы 2 гармонизируются фрезерная головка и панели органов управления.

При пропорционировании станков следует учитывать антропометрические данные, которые оказывают влияние на высоту расположения механизмов управления, на размеры и форму регулировочных окон и крышек к ним.

В результате пропорционирования форма станка становится гармоничной, обладающей соразмерностью, соподчи-

ненностью и ритмичностью. Станок воспринимается как художественно-организационная форма. «Золотое сечение» является элементом, частным случаем, геометрической пропорции в абрисе панелей механизмов управления и фрезерной головки. Метрическим (простым) порядком (рядом) называется расположение одинаковых форм на равных интервалах в пространстве. Закономерное возрастание и убывание элементов формы (колонн, отверстий) или интервалов между ними характеризуют ритмический порядок построения формы в пространстве. При восприятии метрического порядка элементов формы в перспективном уменьшении возникает ритмическое изменение его. На рис. 172 показано расположение крышек на алмазно-расточном станке по метрическому порядку. Если на них смотреть сбоку, то вследствие перспективного уменьшения крышек образуется ритмический ряд.

Метрические и ритмические ряды могут быть образованы без интервалов и с интервалами. Ряды без интервала образуются при членении формы в пределах ее границ.

В метрических и ритмических рядах элементы формы могут быть основными, а интервалы подчиненными, и, наоборот, при соответствующей «активизации» интервалов они могут стать основным элементом ряда. Например, в двухшпиндельном алмазно-расточном станке крышки образуют ритмический ряд. Так как крышки больше по размерам, чем интервалы, и выступают относительно поверхности станины, они воспринимаются более четко, нежели ин-

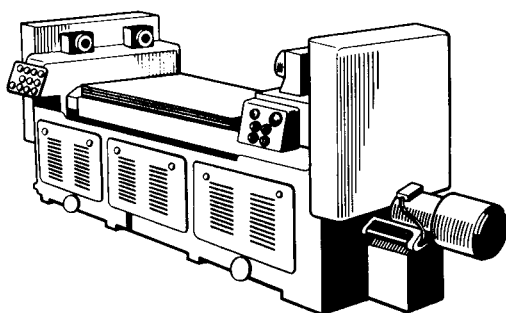


Рис. 172. Алмазно-расточной станок

тервалы. Поэтому в данном ритмическом ряде главными элементами являются крышки, а интервалы — соподчиненными элементами.

§ 3. Цвет и функциональная окраска в промышленности

Цвет во многом определяет красоту машин, приборов, промышленных и жилых интерьеров. Кроме того, правильное использование цвета при окраске оборудования и интерьера цеха уменьшает утомляемость рабочего, повышает производительность труда.

При выборе цвета необходимо решать вопросы, связанные с его характеристиками, физиологией зрения и эмоциональным воздействием цвета на человека.

Первой характеристикой цвета является цветовой тон. В основе цветового тона лежит длина волн излучения, диапазон восприятия которых глазом весьма мал (от 0,45 до 0,76 мкм). В солнечном спектре цвета плавно переходят один в другой, но глаз человека различает в нем более 120 оттенков по цветовому тону. Спектральные цвета: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Цвета, расположенные с противоположных сторон спектра, называют дополнительными, так как при оптическом смешении они дополняют друг друга и дают белый цвет. Дополнительные цвета, расположенные один возле другого, дают максимальный цветовой контраст, например, красный и зеленый. Цвета правой части спектра — красный, оранжевый и желтый — относят к теплым цветам, а цвета левой части спектра — фиолетовый, синий, голубой и зеленый — к холодным. Теплые цвета являются «выступающими», а холодные — «отступающими».

Второй характеристикой цвета является насыщенность данного цветового тона. Насыщенность, или чистоту, цвета измеряют в процентах, причем за 100% принимают насыщенность, соответствующую спектральному цвету, за 0% берут белый или другой ахроматический цвет. Например, если разбавлять красную краску белилами, то насыщенность будет уменьшаться. Насыщенные цвета кажутся тяжелыми.

Третьей характеристикой цвета является яркость, или светлота. Степень яркости определяется мощностью светового потока, отражаемого поверхностью в сторону наблюдателя, и характеризуется коэффициентом яркости, величина которого всегда меньше единицы.

Яркость L является мерой излучения самосветящейся поверхности или поверхности, светящейся отраженным светом:

$$L = \frac{I}{S},$$

где I — сила света; S — площадь видимой поверхности (проекция наблюдаемой поверхности на плоскость, перпендикулярную к направлению наблюдателя).

Единицей яркости является кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$) — яркость источника, каждый квадратный метр излучающей поверхности которого имеет в данном направлении силу света, равную одной канделе.

Яркостной контраст определяет собой заметность двух сравниваемых пятен по светлоте и выражается отношением разности коэффициентов яркостей к большему коэффициенту яркости:

$$K_r = \frac{r_1 - r_2}{r_1} \text{ при } r_1 > r_2,$$

где r_1, r_2 — коэффициенты яркости двух сравниваемых пятен или предметов.

Коэффициент яркости простейшим способом измеряют с помощью ахроматической шкалы, построенной по принципу равномерного убывания яркости эталонов от белого до черного в диапазоне коэффициента яркости от 0,87 до 0,04.

Для подбора колеров окраски оборудования промышленных и жилых интерьеров удобно пользоваться графиком, показанным на рис. 173.

На оси абсцисс этого графика нанесены величины коэффициентов r_1 яркости светлых пятен или предметов; на оси ординат r_2 — более темных пятен или предметов; на сетке дано семейство прямых яркостных контрастов от $K_r = 0$ до $K_r = 0,9$.

«Заметный», «хорошо заметный» и «резко заметный» контрасты и их зоны особо отмечены на графике (рис. 173). Между значениями $K_r = 0$ и $K_r = 0,2$ лежит зона малой заметности I . Эти кон-

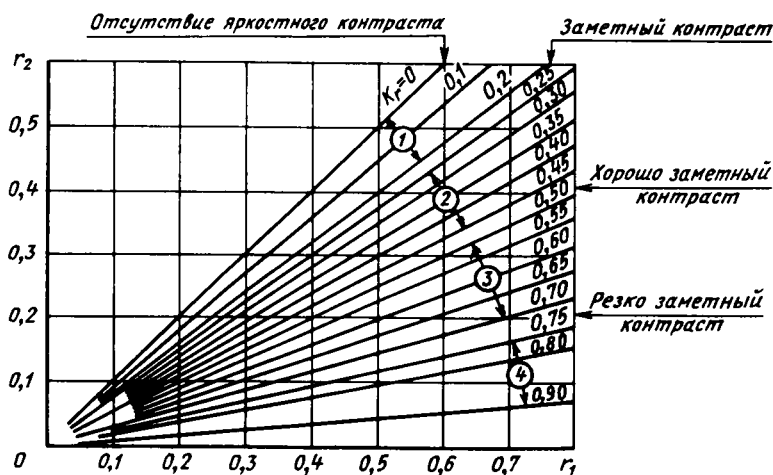


Рис. 173. График яркостных контрастов

трасты используются в тех случаях, когда не требуется выделения какой-либо детали, например сигнальной стрелки в приборах. Между значениями $K_r = 0,25$ и $K_r = 0,45$ находится зона нормальных контрастов 2, которые используют при многоцветной окраске производственных интерьеров и машин. Это спокойные, но очень четко видимые контрасты. Между значениями $K_r = 0,50$ и $K_r = 0,70$ расположена зона повышенных контрастов 3, которые используются для органов управления машиной, чтобы легче находить их при пользовании.

За значениями $K_r = 0,75$ лежит зона резко заметных контрастов 4, которые используют преимущественно в приборах информации и аварийных органах управления.

Следует иметь в виду, что частая смена наблюдаемых контрастов вызывает утомление зрения, снижает производительность труда и может привести к травматизму. Поэтому окраска станков и интерьеров должна иметь, по возможности, мягкие переходы без больших яркостных контрастов.

Есть три теории использования цвета в художественном конструировании.

1. Теория динамического цвета — ее сущность состоит в подборе такой колористики цветов интерьера, которая должна держать рабочего в постоянном напряжении и этим стимулировать по-

вышение производительности труда благодаря применению раздражающих и бодрящих цветов: пурпурного, красного, оранжевого. Опыт использования такой колористики показал, что производительность растет в начале работы, затем она снижается, а к концу работы резко падает.

2. Теория оптимальных цветов рекомендует применять зелено-желтую часть спектра. Эти цвета наиболее благоприятны с физиологической точки зрения. Однако применение монохромных (однотонных) цветов обедняет палитру интерьера и утомляет рабочего.

3. Теория согласованных цветов обосновывает выбор колористики цветов интерьеров и других объектов, согласуя ее с колористикой природы. Эта теория еще недостаточно разработана, хотя она наиболее перспективна для цветового решения промышленных объектов и изделий при их художественном конструировании.

Цвета могут быть резкими или мягкими, яркими или приглушенными, приятными или неприятными, действующими угнетающе, возбуждающе или успокаивающе: зеленый — успокаивающий, освежающий цвет; голубой и желтый — цвета спокойные; синий — беспокойный; оранжевый — бодрящий, радостный; красный и пурпурный — возбуждающий; фиолетовый — угнетающий, вызывающий печаль.

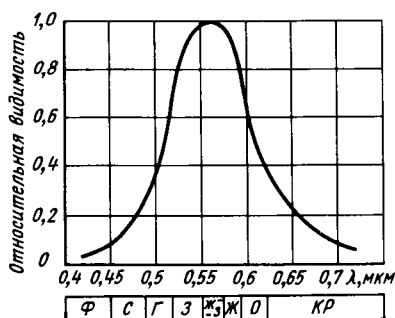


Рис. 174. Кривая видимости солнечного спектра (λ — длина волны)

Цвета солнечного спектра глаза воспринимают неодинаково. Кривая видимости спектра (рис. 174) показывает, что максимум видимости падает на его зелено-желтую часть, что совпадает с максимумом энергии в спектре излучения солнца. Поэтому наиболее спокойными цветами являются зелено-желтый и зеленый. Цвета этой области дают более устойчивое и спокойное восприятие, а крайние участки спектра (фиолетовый и красный цвета) вызывают наибольшую утомляемость глаза и раздражение нервной системы. Цвета крайних участков спектра безболезненно воспринимаются глазом при малой их насыщенности.

Разные цвета, лежащие в одной плоскости, могут создавать зрительную иллюзию, что они находятся в разных плоскостях: одни будут казаться ближе, другие — дальше.

Установлено, что теплые хроматические цвета (красный, оранжевый, желтый) и светлые ахроматические (белый, светло-серый) являются выступающими, а холодные (зеленый, синий, голубой, фиолетовый) и цвета темные ахроматические (черный и близкие к нему) — отступающими.

Обычно используют не чистые цвета, а смешанные, соответствующим подбором оттенков можно ослабить и корректировать влияние их свойств. Так, лимонно-желтый цвет, имеющий незначительный зеленоватый оттенок, холоднее золотистого, приближающегося к оранжевому. Серо-голубой — теплее небесно-голубого; голубовато-зеленый — холоднее зеленого, а фисташко-

вый (сероватый желто-зеленый) — теплее травяного зеленого. Приблизительная отражательная способность цветов (коэффициент отражения) в %: белый — 83; кремовый — 78; желтый — 75; светло-розовый — 70; бронзовый — 60; серый — 55; светло-голубой — 55; светло-зеленый — 55; оранжевый — 50; бирюзовый — 40; бледно-лиловый — 40; темно-зеленый — 20; красный — 14; коричневый — 15; оливковый — 10; фиолетовый — 10.

Чрезмерная простота, яркость и монотонность цветов утомляют глаза. В небольших помещениях число использованных цветов должно быть минимальным — это увеличивает помещение. Панели членят стены, в помещении с низкими потолками панели не нужны, с высокими допустимы. Вертикальное членение стен делает их выше, горизонтальное — ниже и шире. Выступающие цвета снижают высоту, а отступающие — увеличивают. Горячие цеха следует красить холодными цветами; цеха, расположенные на северной стороне, где меньший доступ солнечных лучей, — теплыми. Рекомендуемый коэффициент отражения поверхностей интерьера (%): пол — 40—15; стены — 60—40; потолок и верхняя часть стены — 70—65; технологическое оборудование — 55—25.

Предупредительная окраска подвижных частей машин, внутрицехового транспорта и линий ограничения движений должна резко отличаться от цвета окраски неподвижных деталей, интерьера цеха. Такими цветами являются желтый или светло-оранжевый в сочетании с белыми или черными полосами. Черные полосы и обрамление ими деталей транспорта четко выделяют его на фоне интерьера. Наиболее распространенная гамма расцветок оборудования в механических цехах: зеленая, серая, желтая, светло-зелено-голубая, бежевая, светло-серая, коричневая, темно-коричневая.

§ 4. Промышленный интерьер и экстерьер

Промышленным интерьером называют внутреннюю часть помещения (стены, потолок, пол) с оборудованием. Интерьеры весьма разнообразны, и вид их определяется функциональным

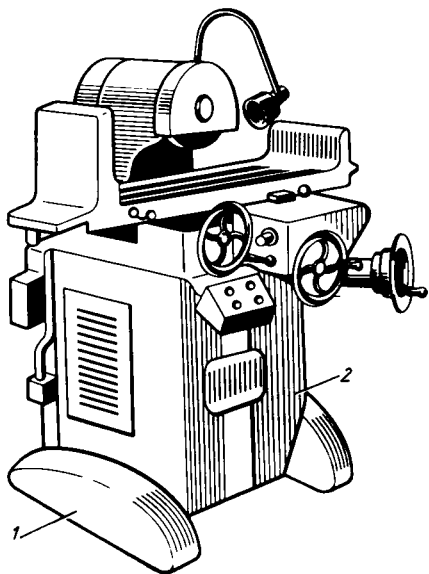


Рис. 175. Плоскошлифовальный станок

назначением и характером производства (массовое, серийное, единичное). Инженер-технолог и художник-конструктор организуют пространство цеха на основе технологического процесса и эстетических требований.

Интерьер механического цеха состоит из самого помещения — стен, перегородок, колонн, ферм, потолка, пола; технологического оборудования — станков, машин, автоматических линий, межстаночного транспорта; внутрицехового транспорта — кранов, электро- и автокранов, ручных тележек, конвейеров и т. п.; коммуникаций — водопровода, газопровода, магистралей для сжатого воздуха, силовой и осветительной электропроводки, телефонной проводки, вентиляции и др.; оснастки рабочего места — инструментальных столиков, стеллажей, специализированных стульев; промышленной графики — плакатов, досок для инструкций и объявлений; визуальных ком-

муникаций — указателей служб, цветных полос, обрамляющих транспортные пути.

Устройство промышленного интерьера должно учитывать следующие требования: максимальное удобство в работе, отсутствие вибраций, чистоту воздуха, создание цветового климата. Все это должно создавать лучшие гигиенические условия труда, повышать производительность и вызывать радость.

Таким образом, разработка промышленного интерьера связана с глубоким анализом его функций, технологического процесса изготовления изделий и умелой эстетизацией как отдельных элементов, так и всего комплекса интерьера.

Экстерьером называется наружная часть помещения: двор и все то, что находится во дворе. Промышленному экстерьеру уделяют большое внимание — оформляют стены, объемы (резервуары и т. п.), делают удобными подъезды к цеху, дорожки к проходу на рабочее место, скверы. Экстерьер должен вписываться в окружающую естественную среду. Все это будет влиять как на лучшее выполнение функции, так и на хорошее настроение всех работающих.

В станкостроении выражена тенденция к применению прямолинейных форм (см. рис. 169, 172).

В качестве примера на рис. 175 показан плоскошлифовальный станок, у которого форма базовой детали — станины 2 не соответствует функции. Основание станины, которая при работе находится в неподвижном положении, выполнено в виде крыльев автомобиля 1; эти крылья к тому же еще мешают доступу к станку, а неоправданно сложная форма станины затрудняет технологию отливки, что увеличивает стоимость ее изготовления. Динамическая форма крыльев станины создает впечатление, что станок в большей мере приспособлен для перемещения по цеху, нежели для работы на месте.

Глава 23 Гидравлические и пневматические устройства станков

§ 1. Составление схемы гидро-, пневмо- и пневмогидросистем станка

Металлорежущие станки, автоматы и автоматические линии оснащены гидравлическими, пневматическими и пневмогидравлическими устройствами, выполняющими функции приводов, систем управления, усилителей, систем смазки и охлаждения. Использование в станках гидравлики и пневматики позволяет сравнительно простым способом автоматизировать технологические процессы, механизировать тяжелые и трудоемкие операции, упростить управление и снизить себестоимость оборудования. Применение гидропривода в станках позволяет существенно упростить их кинематику, повысить точность и надежность работы, снизить металлоемкость.

Средства гидроавтоматики обеспечивают оптимальное регулирование технологических процессов в пределах установленной мощности, программное и дистанционное управление приводами, высокое быстродействие, возможность работы в напряженных динамических режимах и другие эксплуатационные показатели.

Средства пневмоавтоматики широко используют как отдельно, так и в сочетании с гидравлическими и электрическими устройствами. Пневматические устройства высокого давления применяют для построения систем автоматизации малой сложности. Пневматические устройства среднего давления используют в относительно сложных системах автоматизации (например, в автоматических линиях), а пневмоустройства низкого давления (струйная

автоматика) применяют в сочетании с усилительными звеньями для автоматизации сложных систем (например, станки с программным управлением). Устройства струйной пневмоавтоматики имеют большую долговечность (до $2 \cdot 10^7$ циклов).

Для приведения в действие исполнительных рабочих органов станков применяют гидравлические и пневматические устройства, обеспечивающие скорость и силу, необходимые для работы режущих инструментов. Скорость в этих устройствах регулируют за счет изменения объема жидкости или воздуха, питающих двигатель или силовой цилиндр. Требуемую силу создают, регулируя давление системы с помощью клапана, установленного в нагнетательной полости. Гидро- и пневмоустройства также включают аппаратуру управления, контрольно-регулирующую аппаратуру и некоторые вспомогательные элементы в виде трубопроводов, фильтров, теплообменников, приборов для измерения давления и некоторых клапанов. Все эти элементы объединяют в гидро- или пневмосистемы. Для удобства монтажа аппаратуру управления, контрольно-регулирующую аппаратуру и некоторые вспомогательные элементы устанавливают на одной плите (панели управления).

Гидросхема станка, обеспечивающая поступательно-возвратное движение стола 9 поршня 10 и его остановку в любом положении показана на рис. 176. Электродвигатель 2 приводит во вращение насос 4, засасывающий масло из бака 1 по трубе 15 и подающий его под давлением через фильтр 6 и распределитель 7 в левую полость цилиндра 8. Из правой полости

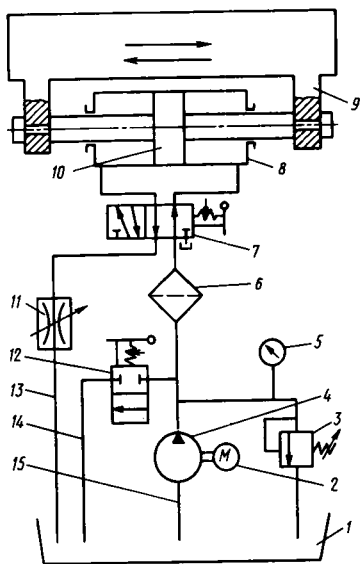


Рис. 176. Гидросистема станка

цилиндра масло через распределитель 7, дроссель 11 и трубопровод 13 попадает в бак. Давление в гидросистеме настраивают предохранительным клапаном 3 и контролируют манометром 5. Если давление жидкости в клапане 3 превысит усилие его пружины, то жидкость будет проходить через клапан в бак. Если переключить распределитель 7, то масло, подаваемое насосом 4, будет через фильтр и распределитель поступать в правую полость цилиндра 8, и одновременно его левая полость соединится с баком. При этом направление движения стола изменяется. Для останова стола необходимо повернуть кран 12, в результате чего рабочая жидкость будет свободно сливаться в бак через трубу 14, и давление в гидросистеме уменьшится. Дроссель 11 представляет собой регулируемое гидравлическое сопротивление, с помощью которого можно изменять количество жидкости, проходящей из гидроцилиндра в единицу времени, и, следовательно, скорость движения стола.

Анализируя рассмотренную схему, можно выделить основные элементы, из которых состоит гидросистема станка: гидроцилиндр и насос, аппаратура управления (7 и 12), аппаратура контроля и регулирования давления (3 и

5), аппаратура для регулирования расхода (11), а также трубопроводы и арматура (13), бак (1) с рабочей жидкостью, фильтр (6). От качества работы этих устройств зависит надежность работы всей гидросистемы станка. Чтобы обеспечить плавную работу с минимальными потерями на трение, в качестве рабочей жидкости применяют минеральное масло, обладающее хорошей смазывающей способностью.

Для упрощения системы управления станка в качестве рабочей среды используют воздух.

Общий вид пневмосистемы, обеспечивающий движение зажима в станке представлен на рис. 177.

Воздух из сети поступает в фильтр 5. Очищенный воздух под давлением подается в редуктор 6, где устанавливается постоянное рабочее давление в масленку 7. В масленке воздух смазывается и направляется в поворотный кран 9. Поворотный кран управляет зажимом заготовки, устанавливаемой в патроне 4 шпинделя 3 станка. Если воздух из крана 9 поступает по магистральному гибкому шлангу 10 через распределитель 1 в полость пневмоцилиндра 2, происходит зажим заготовки. Если воздух поступает в пневмоцилиндр 2 по магистральному шлангу 11, происходит разжим обработанной детали.

В связи с тем, что воздух обладает свойством сжимаемости, пневмосистему нельзя применять для получения точных, координированных перемещений. Поэтому к пневмоприводу добавляют еще систему гидравлического торможения, обеспечивающее плавное движение рабочего органа. Такая система получила название пневмогидросистемы.

На рис. 178 представлена схема пневмогидросистемы, обеспечивающей движение силовой головки 7 агрегатного станка по жесткому циклу (быстрый подвод, рабочая подача, быстрый отвод, стоп).

Воздух под давлением из сети 11 через аппаратуру 12 подготовки воздуха поступает в распределитель 13. Из распределителя он проходит в полость 8 пневмогидроцилиндра и приводит в движение силовую головку 7. (Поршень 9 укреплен неподвижно на станине станка.) В этот момент происходит быстрый подвод силовой головки 7 к обрабатываемой детали, масло из полости 10

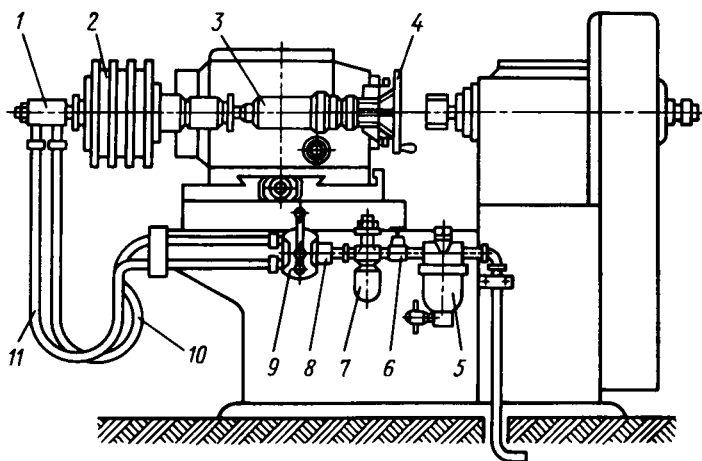


Рис. 177. Пневмосистема станка

проходит через клапан 6 в аккумулятор 4. Когда головка 7 подведет инструмент к обрабатываемой заготовке, линейка 14 своим выступом «утопит» клапан 6, вступит в работу дроссель 3, движение головки 7 замедлится, и начнется медленная рабочая подача, которая будет продолжаться до тех пор, пока не будет переключен распределитель 13. После переключения распределителя 13 воздух по трубопроводу 1 направится в аккумулятор 4 через гаситель 5 кинетической энергии воздуха. Включится быстрый отвод головки. При быстром отводе головки воздух вытеснит масло из аккумулятора 4 через обратный клапан 2 в полость 10 цилиндра. Головка 7 установится в исходное положение и будет стоять до тех пор, пока не подадут команду на повторение цикла.

В рассмотренной пневмогидросистеме отсутствуют насос, масляный бак, ряд клапанов. Однако малое давление ограничивает применение системы.

Аналогичный цикл работы осуществляют и с помощью гидросистемы, в которой можно развивать высокое давление масла, поэтому такие системы чаще применяют в станках. На рис. 179 приведена гидросхема, обеспечивающая жесткий цикл работы суппорта станка — быстрый подвод, рабочая подача, быстрый отвод. Схема приведена в полуконструктивном изображении, позволяющем удобнее производить расчет элементов.

Масло из бака 1 насосом 2 подается под давлением, регулируемым клапа-

ном 3, через распределитель 4 в полость 8 цилиндра. Начинается быстрый подвод суппорта 10 с инструментами к обрабатываемой заготовке 11. В этот момент масло из полости 9 вытесняется через осевой распределитель 13 и распределитель 4 по трубе 17 на слив в бак 1. Когда суппорт 10 с инструментом подойдет к обрабатываемой заготовке, линейка 12 «утопит» осевой распределитель 13 (это положение показано на схеме), суппорт остановится и начнется рабочая подача.

При рабочей подаче масло из полости 9 пойдет через редукционный клапан 15 и дроссель 16, распределитель 4, по трубе 17 в бак. Подача будет продолжаться до момента переключения сухарями 7 распределителя 4 через осевой кран 6 (обратные клапаны 5 слу-

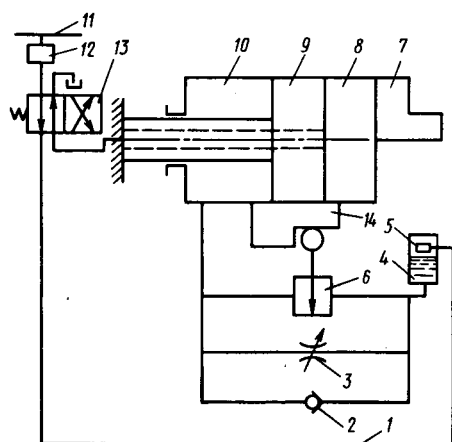


Рис. 178. Схема пневмогидросистемы станка

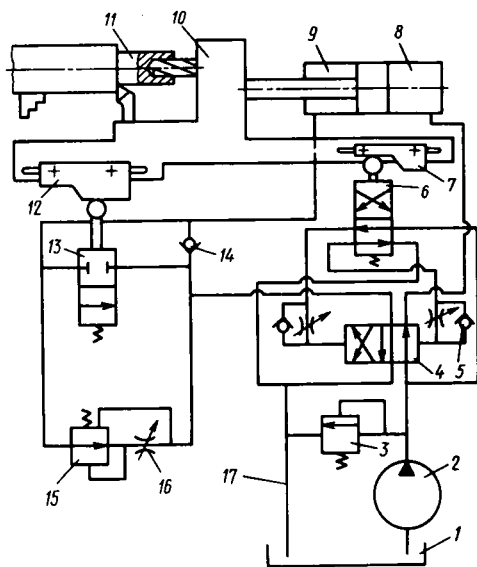


Рис. 179. Гидросхема, обеспечивающая цикл работы суппорта станка

жат для регулирования скорости переключения распределителя 4). После переключения распределителя 4 в правое положение начнется быстрый отвод суппорта 10 в исходное положение. При отводе суппорта масло от насоса 2 через распределитель 4, обратный клапан 14, осевой распределитель 13 поступает в полость 9 цилиндра, а из полости 8 оно через распределитель 4 попадает в трубу 17 на слив в бак. Перемещением линейки 12 можно регулировать подвод суппорта к заготовке, перемещением кулачка 6 — длину хода суппорта. Поворотом дросселя 16 обеспечивается бесступенчатое регулирование скорости рабочей подачи инструмента в заданном интервале.

Гидравлические устройства применяются также и в копировальных приспособлениях станков. На рис. 180 представлена гидросхема копировально-фрезерного станка, позволяющая уменьшить нагрузку на копир 5 до минимальной величины.

Масло от насоса 1 через фильтр 3 под давлением, которое контролируют манометром 4 и настраивают предохранительным клапаном 2, поступает в среднюю камеру распределителя 7. Золотник распределителя 7 пружиной

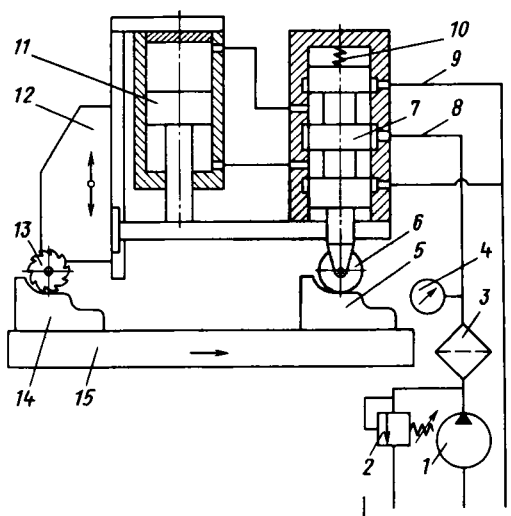


Рис. 180. Гидросхема копировально-фрезерного станка

10 постоянно прижимается через ролик 6 к копиру 5. Копир вместе с обрабатываемой заготовкой 14 установлен на столе 15 станка, движущемся в одном направлении ($s_{пр}$ — продольная подача). Заготовку 14 обрабатывают фрезой 13, установленной в головке 12. Головка 12 перемещается поршнем 11 вертикального гидроцилиндра, закрепленного неподвижно на станине станка. Корпус следящего распределителя 7 жестко связан с головкой 12. Крайние камеры распределителя 7 соединены со сливной магистралью 9, а проточки — с полостями гидроцилиндра 11. При движении стола 15 с постоянной скоростью положение ролика 6, а следовательно, и распределителя 7 в каждый момент времени зависит от профиля копира 5. Если копир 5 поднимается вверх, распределитель 7 также поднимается вверх, сжимая пружину 10. При этом нижняя полость гидроцилиндра соединена с напорной магистралью 8 гидросистемы. Появляющаяся на поршне гидроцилиндра сила поднимает головку 12 вместе с фрезой 13 и корпусом распределителя до тех пор, пока магистрали 8 и 9 не будут перекрыты кромками распределителя 7.

Если копир опускается, то движение головки 12 с фрезой 13 реверсируется. Таким образом, головка 12 с фрезой 13 постоянно следует за движением распределителя 7 и на обрабатываемой заготовке 14 воспроизводится профиль копира 5. Поэтому вертикальная подача s_v будет переменной как по величине, так и по знаку. Сила, действующая на копир, невелика, так как она необходима лишь для перемещения распределителя 7 и деформации пружины 10, поэтому копир может изготавливаться из нежестких материалов (пластмассы, дерева, гипса). Сила, развиваемая поршнем 11, достаточна для преодоления сил резания и перемещения головки 12. Следовательно, в этом приводе мы видим пример гидравлического усилителя мощности.

Рассмотренные случаи применения приводов позволяют отметить, что гидроприводы позволяют: развивать большие силы при малых размерах исполнительных органов, высокое быстродействие, у них можно просто регулировать скорость, позволяют работать в динамических режимах и по жестким упорам, а также обеспечивать широкие возможности автоматизации рабочего цикла различных станков.

Наряду с указанными преимуществами гидроприводы имеют и ряд недостатков, ограничивающих рациональную область их применения, к ним можно отнести потери на трение и утечки, которые учитывают соответствующими величинами КПД:

$$\eta = \eta_{\text{мех}} \eta_0 \eta_r,$$

где η — общий КПД гидросистемы станка; $\eta_{\text{мех}}$ — КПД, учитывающий потери на трение; η_0 — объемный КПД, учитывающий утечки; η_r — гидравлический КПД, учитывающий потери движения в трубопроводах и каналах элементов гидросистем.

§ 2. Принцип расчета гидро- и пневмосистем станков

Гидро- и пневмоцилиндры преобразуют энергию давления масла или воздуха в механическую энергию движения поршня. Движение от поршня 6 (рис. 181) через шток 12 передается рабочему органу станка 13, кото-

рый движется вдоль направляющих станины 14 с заданной подачей s . Корпус цилиндра 4 установлен неподвижно на станине. Масло (или воздух) поступает в цилиндр по трубопроводам, присоединенным к отверстиям 1 и 9. Для обеспечения торможения в конце хода в крышках цилиндра предусмотрены дроссели 16 и обратные клапаны 15.

При движении рабочего органа вправо масло (или воздух) через отверстие 1 проходит в правую полость 3 цилиндра, а из левой полости 7 происходит вытеснение масла (или воздуха) через отверстие 9. Для сообщения движения рабочему органу 13 станка необходимо на поршне 6 создать такую нагрузку P , которая могла преодолеть сумму сил полезных и вредных сопротивлений:

$$P = R + T_{\text{н}} + T_{\text{ш}} + T_{\text{п}} + T_0 + T_{\text{и}} = R + \Sigma T,$$

где R — нагрузка на шток, возникающая при резании; $T_{\text{н}}$ — сила трения в направляющих станины 14; $T_{\text{ш}}$ — сила трения штока в уплотнении 10; $T_{\text{п}}$ — сила трения поршня 6 в корпусе цилиндра 4; T_0 — сила, возникающая под действием давления масла в обратной полости цилиндра; $T_{\text{и}}$ — сила инерции, возникающая при разгоне рабочего органа станка; ΣT — суммарная сила вредных сопротивлений.

Для создания нагрузки P в полости цилиндра 3 необходимо развить рабочее давление p , следовательно,

$$P = pF = p \frac{\pi D^2}{4},$$

где F — площадь поршня; p — рабочее давление в цилиндре; D — диаметр цилиндра.

Зная величины сил полезных и вредных сопротивлений, можно определить рабочее давление в гидроцилиндре:

$$p = \frac{R + \Sigma T}{F}.$$

При расчетах, как правило,

величина нагрузки R , возникающей при резании, уже известна, а силы вредных сопротивлений необходимо определить. Если направляющие плоские и V-образные, то сила трения в направляющих

$$T_{\text{н}} = \frac{G + R_c}{2} f + \frac{G + R_c}{2 \sin 45^\circ} f,$$

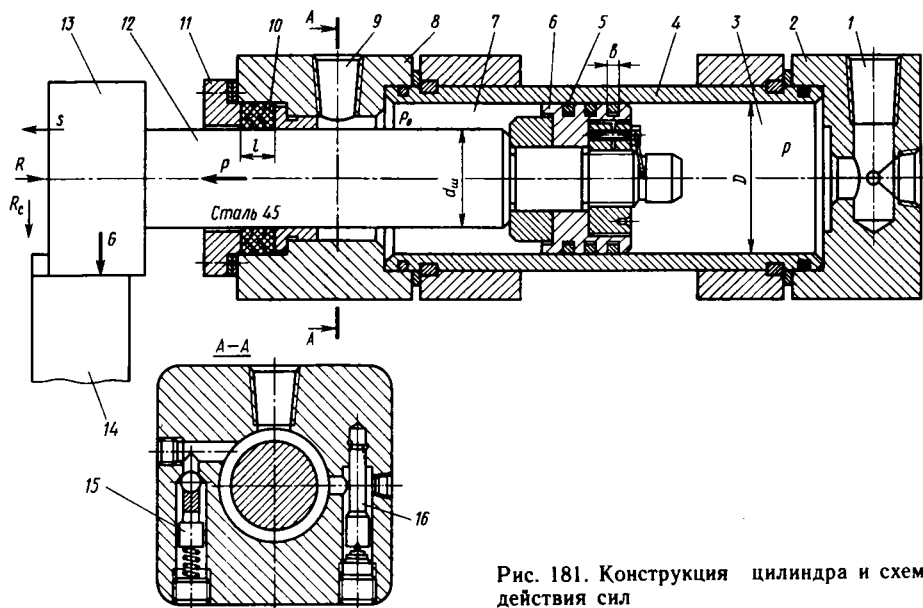


Рис. 181. Конструкция цилиндра и схема действия сил

где G — сила, возникающая под действием веса рабочего органа станка на станину; R_c — составляющая силы резания, прижимающая рабочий орган станка к станине; f — коэффициент трения покоя (обычно $f = 0,16$).

Трение штока $T_{ш}$ в уплотнении 10

$$T_{ш} = \pi d_{ш} l p_y f_y,$$

где $d_{ш}$ — диаметр штока; l — длина уплотнения; p_y — давление уплотнения 10 на поверхность штока, оно зависит от степени зажатия втулкой 11 уплотнения 10 в крышке 8 цилиндра; f_y — коэффициент трения между штоком и уплотнением.

Силу трения поршня в корпусе цилиндра определяют по формуле

$$T_{п} = \pi D b [p + (z - 1) p_k] f_y,$$

где D — диаметр цилиндра; b — ширина уплотнительного кольца 5; z — число уплотнительных колец; p — рабочее давление в цилиндре; p_k — удельное (контактное) давление уплотнительного кольца на стенки цилиндра.

Необходимо, чтобы уплотнительные кольца плотно прилегали к цилиндру и обеспечивали герметичность. Поэтому здесь нужна строгая цилиндричность

как внутренней поверхности цилиндра, так и внешней поверхности сжатого уплотнительного кольца.

Сила T_0 , возникающая под действием давления в обратной полости 7 цилиндра, может быть определена по формуле

$$T_0 = p_0 F_0 = p_0 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2),$$

где p_0 — давление в обратной полости цилиндра; F_0 — площадь поршня со стороны штока.

Сила инерции, возникающая при разгоне рабочего органа 12 станка,

$$T_{и} = \frac{G}{g} \frac{s}{t_a},$$

где G — вес рабочего органа; g — ускорение свободного падения; s — наибольшая подача рабочего органа; t_a — время разгона рабочего органа до требуемой скорости.

Зная рабочее давление в цилиндре, можно определить и давление p_n , которое должен развивать насос:

$$p_n = p + \Delta p,$$

где Δp — потери давления по пути от насоса к цилиндру,

$$\Delta p = \Delta p_{т} + \Delta p_{к} + \Delta p_{г},$$

здесь Δp_t — потери давления в трубах; Δp_k — потери давления в клапанах; Δp_r — потери давления в гидрораспределителе.

Зная давление p , можно определить толщину стенок цилиндра (см. рис. 181):

$$\delta = \frac{Dp}{2R_z},$$

где R_z — допустимая величина напряжений из условий жесткости.

По этой же формуле можно определить толщину стенки трубопровода, канала или кольцевого отверстия.

Потери давления в трубах определяют по формуле

$$\Delta p_t = \lambda \frac{l_t}{d_t} \frac{v^2}{2g} \gamma,$$

где λ — коэффициент, учитывающий характер потока; l_t — длина трубы; d_t — диаметр трубы; v — скорость жидкости в трубе; γ — удельный вес жидкости.

Чтобы поршень развил скорость S в цилиндре, необходимо подать определенный объем жидкости или воздуха, а именно $Q = FS$, где F — большая площадь поршня.

При расчете гидро- или пневмосистемы станка задают минимальные и максимальные скорости движения и определяют наибольший объем масла, который необходимо подать в цилиндр, чтобы получить максимальную скорость перемещения рабочего органа 12 станка (см. рис. 181):

$$Q_{\max} = FS_{\max}$$

По величине этого объема выбирают производительность насоса

$$Q_n = \frac{Q_{\max}}{\eta_0},$$

где η_0 — объемный КПД гидросистемы.

После определения Q_n выбирают стандартный насос (по величине давления и производительности).

Мощность N (кВт) на валу насоса можно определить по формуле

$$N_n = \frac{Q_n p_n \cdot 10}{612},$$

где Q_n — производительность насоса, л/мин; p_n — давление жидкости в насосе, мПа.

Далее следует определить объем бака насосной установки и других элементов.

Диаметр трубы $d_t = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$, где Q — расход жидкости (или воздуха), проходящего через трубу; v — скорость течения жидкости или воздуха по трубе. Предварительно объем бака V_6 выбирают из условия, что $V_6 = (3 \div 5) Q_n'$, Q_n' — производительность насоса за 1 мин.

Далее производят проверку по условиям тепловых выделений в процессе работы гидросистемы:

$$V_6 = V \left(\frac{q}{4\Delta t} \right)^3,$$

где q — количество теплоты, выделяемое гидросистемой в течение часа, кДж;

$$\Delta t = t_m - t_0,$$

здесь t_m — температура масла; °С; t_0 — температура окружающей среды, °С.

Количество теплоты q , выделяемое гидросистемой, можно определить по формуле

$$q = \frac{t}{T} \left[p Q_n \left(\frac{1}{\eta} - \theta \right) + \Sigma \Delta p \right],$$

где t — время одного перехода; T — время рабочего цикла; p — давление в гидросистеме; η — КПД насоса; θ — коэффициент загрузки насоса, $t = \frac{Q}{Q_n}$; Q — расход масла через элемент гидросистемы; Δp — потери давления в элементе гидросистемы;

Если $V_6 > V_0$, то необходимо взять $V_6 = (3 \div 5) Q_n'$ и установить теплообменник. Площадь поверхности воздушного теплообменника $F = \frac{q - q_0}{K \Delta t}$, где q_0 — количество теплоты, рассеиваемое баком объемом V_0 , $q_0 = 4\Delta t \sqrt[3]{V_0^2}$; K — коэффициент теплопередачи от масла к окружающей среде.

§ 3. Основные элементы гидро- и пневмосистем станков

Основными элементами гидро- и пневмосистем станков являются клапаны, дроссели, регуляторы скорости, распределители, краны управления и др. Комбинация этих аппаратов позволяет составлять самые различные типы систем, обеспечивающих простые и сложные циклы движения рабочих органов станков. Они позволяют регулировать давление, скорость перемещения, изменять направление движения, обеспечивать пуск и останов рабочих органов станков и другие операции. Для регулирования давления в гидросистемах применяют различные клапаны: предохранительные, переливные, подпорные, редукционные, дозирующие, противодействия и т. д. Предохранительные клапаны устанавливаются для ограничения величины максимального давления в гидросистеме. Клапан работает периодами и перепускает часть масла на слив, а гидросистема при этом работает в аварийном режиме при предельно допустимом рабочем давлении. Переливные клапаны выполняют также функции

регуляторов рабочего давления, т. е. поддерживают в гидросистеме давление в требуемых пределах за счет перелива части масла на слив.

На рис. 182 показан предохранительный клапан с переливным золотником. Напорная магистраль гидросистемы соединена с камерой 11 клапана, сообщающейся с камерами 12 и 9 через отверстия в корпусе 7 и с полостью 13 через отверстие 8 малого диаметра (жиклер). Таким образом, давление масла на переливной золотник 6 уравнивается, а усилие слабой пружины 5 прижимает его к корпусу. На шарик 2 шарикового сервоклапана действует давление масла в камере 13 и усилие пружины 1, регулируемой винтом. Если давление масла преодолет усилие пружины, шариковый клапан откроется, пропуская небольшое количество масла из камеры 13 на слив, через отверстие в крышке 3 корпуса 7 и камеру 10. При этом камера 13 пополнится маслом через жиклер 8. Вследствие сопротивления потоку масла в жиклере между камерами 9 и 13 возникает перепад давления, заставляющий золотник 6 подняться вверх и соединить своими проточками камеры 11 и 10, в результате чего часть масла от насоса поступит на слив, и давление в системе уменьшится. При снижении давления в камере 11 ниже того, на которое отрегулирована пружина 1, шарик 2 будет прижат к седлу 4, поток масла из камеры 13 на слив прекратится, давление в камерах 13, 12 и 9 выравняется, и пружина 5 переместит золотник вниз. Таким образом, клапан поддерживает постоянное давление в гидросистеме, отводя избыточное масло в бак.

Для регулирования скорости рабочего органа станка в гидросистемах, оснащенных нерегулируемыми насосами, применяют дроссели, изменяющие свое проходное сечение. Дроссель представляет собой местное сопротивление, устанавливаемое на пути течения масла для ограничения его расхода.

По принципу действия дроссели классифицируют на дроссели вязкого и инерционного сопротивления (рис. 183). В дросселях вязкостного сопротивления потери давления определяются в основном вязкостным сопротивлением потока масла, поэтому потери давления являются линейной функ-

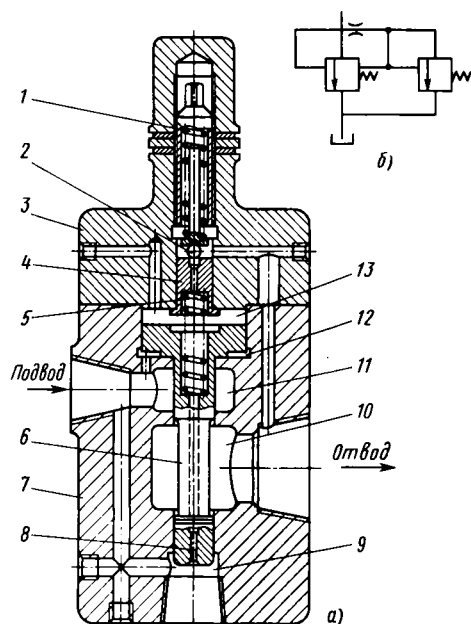


Рис. 182. Предохранительный клапан:
а — конструкция; б — условное изображение

цией расхода масла. Потеря давления в дросселях инерционного сопротивления зависит в основном от инерционных сил (деформации потока масла), поэтому изменение давления происходит практически пропорционально квадрату расхода масла. Расход в дросселях этого типа значительно меньше зависит от вязкости масла.

Существуют нерегулируемые и регулируемые дроссели. В дросселях с линейной зависимостью расхода Q от перепада давления Δp рабочее сечение имеет канал большой протяженности (поз. 1—4, рис. 183). Такие дроссели могут быть выполнены в виде винтовой пары с неполной резьбой, иглы, перемещающейся в коническом от-

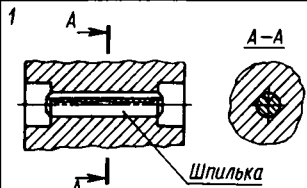
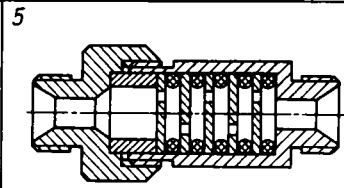
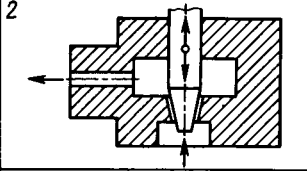
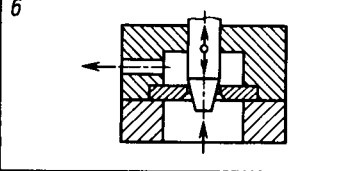
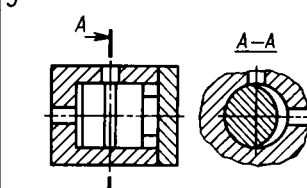
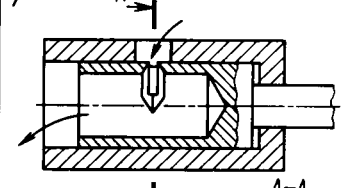
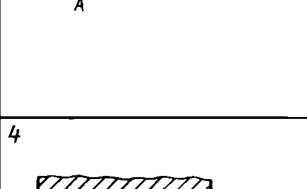
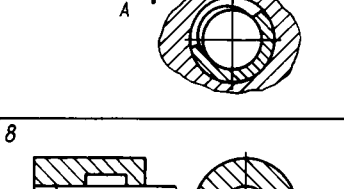
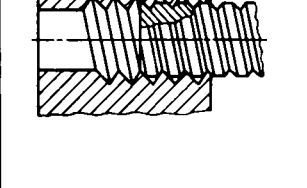
Тип	Дроссели сопротивления	
	вязкого	инерционного
Нерегулируемый	1 	5 
	2 	6 
Кранового типа	3 	7 
	4 	8 
Прочие		

Рис. 183. Типы дросселей

верстии, малого отверстия большой длины или крана с канавкой большой длины.

В дросселях с квадратичной зависимостью расхода от перепада давления рабочее сечение обычно имеет острые кромки. К таким дросселям можно отнести нерегулируемые дроссели в виде набора диафрагм 5, имеющих калиброванные отверстия с острой кромкой, игольчатые дроссели 6, щелевые дроссели 7, дроссели 8 плунжерного типа с усиком и плунжером, перекрывающим узкую щель.

Расход масла через дроссель определяют по формуле

$$Q_{др} = K \mu F_{др} \sqrt{\Delta p},$$

где K — постоянный коэффициент; μ — коэффициент расхода через отверстие дросселя; $F_{др}$ — площадь рабочего сечения окна дросселя; Δp — перепад давления на рабочем окне дросселя.

Пример. Определить расход через дроссель, включенный на выходе из цилиндра при движении поршня диаметром 6,6 см с подачей 2 см³/мин.

Площадь поршня $F = 33$ см², и количество масла на входе дросселя $Q_{др} = 33 \cdot 2,0 = 66$ см³/мин.

По приведенной выше формуле для определения $Q_{др}$ рассчитаем диаметр дросселирующего отверстия для гидросистемы, в которой перепад давления на дросселе $\Delta p = 2,5$ МПа; $K = 0,885$; $\mu = 0,69$:

$$F_{др} = \frac{Q_{др}}{K \mu \sqrt{\Delta p}} = 0,022 \text{ мм}^2,$$

что соответствует отверстию диаметром 0,17 мм.

Столь малое отверстие не может нормально работать и очень быстро засорится даже при хорошей фильтрации масла (в гидравлических устройствах стараются не делать диаметры отверстий меньше 0,6 мм).

Увеличить необходимый диаметр дросселирующего отверстия можно двумя способами: увеличением расхода $Q_{др}$ через дроссель; уменьшением перепада давления Δp . Первое решение неприемлемо, так как при заданной величине минимальной подачи (2 см³/мин) необходимо увеличивать диаметр цилиндра, что приведет к увеличению размеров гидропривода и производительности насоса, а следовательно, и мощности. Если перепад давления на дросселе поддерживать постоянным при изменении нагрузки на поршень, можно получить и постоянную рабочую подачу. Эти возможности реализуют, применяя специальные клапаны, стабилизирующие перепад давления. Дроссель вместе со стабилизатором давления называется регулятором скорости.

На рис. 184 представлена схема регулятора скорости, состоящего из ре-

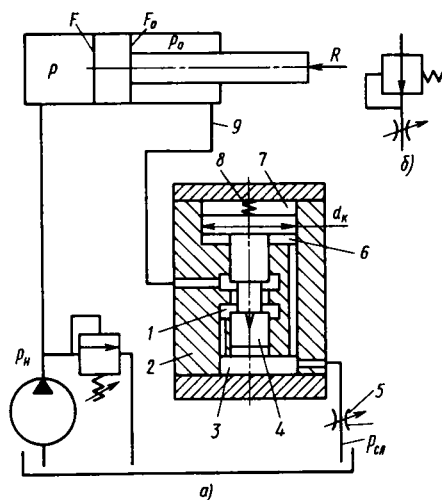


Рис. 184. Регулятор скорости:

а — конструкция; б — условное изображение

дукционного клапана, помещенного в корпусе 2 и поддерживающего независимо от нагрузки R постоянный перепад давления $\approx 0,2$ МПа на дросселе 5.

Здесь регулятор скорости установлен на выходе из цилиндра. Масло из напорной магистрали под давлением p_n поступает в левую полость цилиндра, где создается давление p , действующее на поршень площадью F . Из правой (обратной) полости цилиндра масло вытесняется под давлением p_0 поршнем площадью F_0 , затем по трубе 9 масло поступает к регулятору скорости и через дроссель 5 сливается в бак, причем оно проходит через редукционный клапан 4, дросселируется кромкой 1 клапана, и давление масла снижается до величины $p_{ред}$. Камеры 6 и 3 клапана 4 соединены каналами, поэтому давления в этих камерах равны. Камера 7 соединена с баком, поэтому можно записать уравнение равновесия клапана 2:

$$A = \frac{\pi d_k^2}{4} p_{ред},$$

где A — усилие пружины 8 клапана; d_k — диаметр клапана.

Следовательно, если усилие A пружины будет равно постоянной величине, то и $p_{ред} = \text{const}$.

В правой полости цилиндра (рис. 184) давление $p_0 = \frac{pF-R}{F_0}$ изменяется при изменении нагрузки R . Однако редукционный клапан 4 снижает давление p_0 до величины $p_{ред}$, поддерживая перепад давления у дросселя 5 также постоянным: $\Delta p = p_{ред} - p_{сл} = 0,2 \text{ МПа}$, где $p_{сл}$ — давление слива.

Так как величина $\frac{A}{\pi d_k^2/4} = \text{const}$, следовательно, и $p_{ред} = \text{const}$, поэтому можно сказать, что редукционный клапан 4 поддерживает постоянное давление перед дросселем. Если давление $p_{ред}$ увеличивается, клапан 4 поднимается вверх, и его рабочая кромка 1 прикрывает проход для масла из гидроцилиндра в дроссель 5, при уменьшении давления $p_{ред}$ клапан 4 опускается вниз, и дросселирование масла кромкой 1 уменьшается. Взаимодействие дросселя и редукционного клапана обеспечивает постоянство расхода масла через регулятор скорости независимо от изменения величины рабочей нагрузки R на поршне. Малая величина перепада давления у дросселя позволяет иметь довольно большую площадь его проходного сечения при минимальных расходах, что обеспечивает надежную работу регулятора.

Для изменения направления потока жидкости в гидросистемах или воздуха в пневмосистемах станков применяют реверсивные распределители. Схема простейшего реверсивного распределителя кранового типа была дана на рис. 176. При повороте рабочего элемента в этом распределителе изменяется направление движения поршня гидроцилиндра. Четырехходовой распределитель осевого типа (см. рис. 179) обеспечивает изменение направления потока масла в силовой гидроцилиндр. Несмотря на кажущуюся простоту распределителей, при их изготовлении и эксплуатации возникают различные трудности, например, необходимо одновременно обеспечить минимальную величину утечек и минимальную силу для перемещения распределителя.

Во время работы распределителя на его плунжер действуют гидродинамические и гидростатические силы, которые могут достигать значительной величины и нарушать работу привода.

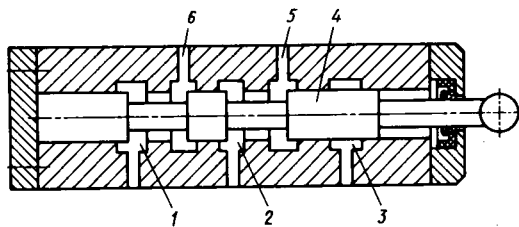


Рис. 185. Схема распределителя осевого типа

На рис. 185 представлена конструктивная схема распределителя осевого типа.

Масло от насоса поступает в камеру 2 и в зависимости от смещения золотника 4 проходит в отверстие 6 (или 5) и в соответствующую полость рабочего цилиндра, обеспечивая, таким образом, реверс рабочего органа станка. Слив масла из цилиндра происходит через камеру 3 (или 1) в бак.

Переключение распределителя осуществляется либо вручную, либо дистанционным электрическим, гидравлическим или электрогидравлическим устройствами.

Изготовленный по стандартной технологии, смазанный маслом распределитель при комнатной температуре должен свободно перемещаться в корпусе под действием собственного веса, однако при работе гидросистемы необходимая для перемещения распределителя сила может быть в сотни раз больше. Основной причиной, увеличивающей силы трения в реверсивных распределителях, является неравномерное распределение давления в зазоре между распределителем и корпусом, через который масло протекает из камеры высокого давления в камеру низкого давления. Неравномерность распределения давления возникает в результате неточности изготовления распределителя и отверстия в корпусе. Величину погрешностей изготовления (конусообразность, овальность, бочкообразность, огранка) измеряют микрометрами, однако она очень сильно влияет на величину заземляющей силы. Эксперимент показал, что при давлении 20 МПа сила, необходимая для перемещения золотника диаметром 20 мм, достигает 5 мН.

§ 4. Рабочая среда, ее свойства и аппаратура, применяемая для подготовки жидкости и воздуха для работы в гидросистемах станков

В гидросистемах станков в качестве рабочей среды применяют масло, обладающее постоянной вязкостью и хорошими смазывающими способностями. В пневматических системах рабочей средой является воздух, насыщенный маслом (воздух, обогащенный масляным туманом).

Рабочая жидкость характеризуется вязкостью, которая определяет потери на трение в трубопроводах, каналах аппаратов, а также потери на утечки.

С одной стороны, кажется целесообразным увеличивать вязкость, ведь насосы, клапаны, распределители изготовляют без внутренних уплотнений (высокое давление обеспечивается при малых зазорах в рабочих элементах). Через зазоры происходит утечка масла, которая вредна, так как уменьшает количество масла, поступающего в гидромотор, и снижает скорость движения рабочих органов.

Повышенные утечки приводят к потерям мощности и увеличению температуры масла. Величина утечки может быть уменьшена при использовании более вязких масел. С другой стороны, повышенная вязкость масла приводит к увеличению сил механического трения в гидроприводе, что снижает его КПД. Кроме того, при повышении вязкости ухудшается всасывающая способность насосов, увеличивается сопротивление трубопроводов и каналов, снижается быстродействие. Все это приводит к повышенному разогреву масла.

Поэтому рекомендации по выбору масла для гидросистем станков основаны главным образом на результатах испытаний в реальных условиях. Обычно более вязкие масла применяют в системах высокого давления для уменьшения утечек и компенсации снижения вязкости в результате разогрева. Здесь могут быть допущены большие потери давления в трубах, так как относительное влияние этих потерь на работу станка невелико. В системах низкого давления (до 7 МПа) целесообразно применение менее вязких масел, так как утечки при низком давлении меньше, а потери в трубопроводах влияют сильнее.

Для того чтобы увеличить долговечность и обеспечить надежную работу гидросистем, необходимо постоянно очищать масло. Масло от находящегося в нем во взвешенном состоянии загрязняющих частиц очищают с помощью фильтров. Фильтры устраняют как начальное загрязнение системы, так и загрязнение, образующееся во время ее работы в результате износа деталей гидравлических агрегатов или смазывающих механизмов и попадания загрязнений из окружающей среды.

Загрязняющие частицы задерживаются стальными пластинками, сетками или магнитным полем на поверхности фильтрующих элементов либо на поверхности и в глубине фильтрующих элементов, изготовленных из пористых материалов: войлока, фетра, картона, металлокерамики, пластмасс. По тонкости фильтрации (размер задерживаемых частиц) фильтры делятся на три группы: грубой очистки (до 80 мкм), нормальной очистки (25—40 мкм), тонкой очистки (10 мкм и менее).

Фильтры в гидросистеме устанавливают параллельно или последовательно. При последовательном включении фильтра через него проходит весь поток масла, подаваемого насосом, при параллельном включении — лишь часть потока масла.

На рис. 186 представлен фильтр пластинчатого типа

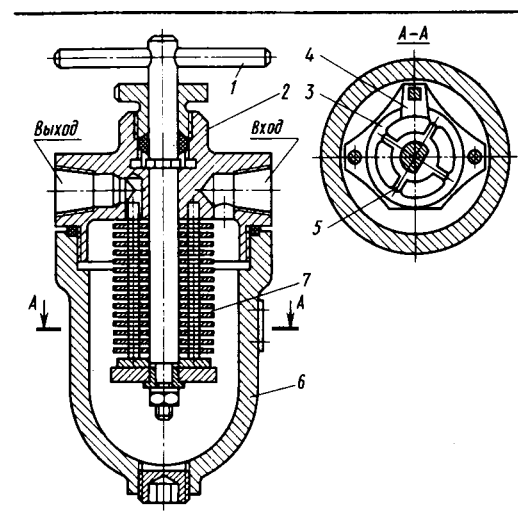


Рис. 186. Фильтр пластинчатого типа:
а — конструкция; б — условное изображение

рации 80 мкм. Через впускное отверстие «Вход» в крышке 2 загрязненное масло поступает в корпус 6. Через щели 7 между основными пластинами 3 масло попадает во внутреннюю полость фильтра, образованную вырезами в основных пластинах, откуда и проходит к отводному отверстию «Выход». При повороте рукоятки 1 ножи 4, входящие в прорезы между основными 3 и промежуточными 5 пластинами, счищают слой загрязнений, скопившийся в щелях.

Количество жидкости, проходящее через фильтр, зависит от размера щелей, его определяют по формуле

$$Q_{\phi} = F_{\phi} v,$$

где F_{ϕ} — площадь фильтрующей части; v — скорость прохождения масла через фильтр;

$$F_{\phi} = 0,7 \pi D \delta n,$$

где D — диаметр фильтрующей части; δ — ширина щели фильтра; n — число щелей в фильтре.

В гидросистемах станков в качестве источников снабжения маслом применяют насосные установки, которые монтируют из нормализованных гидроаппаратов общего назначения.

При проектировании насосных установок особое внимание уделяют обеспечению чистоты масла в гидросистеме. Баки для масла должны быть тщательно закрыты во избежание попадания в масло стружки, абразива, воды и др. Для этого между крышкой и корпусом бака ставят уплотнительную прокладку, учитывая возможное колебание уровня масла в баке во время работы станка. В крышке бака устанавливают сапун, соединяющий воздушную полость над поверхностью масла с атмосферой специальным каналом, защищенным от попадания извне крупных механических частиц.

Бак необходимо заполнять только чистым маслом. Для предотвращения попадания загрязнений при заливке в заливной горловине устанавливается сетка с размером ячеек 0,1×0,1 мм. Всасывающий и сливной трубопроводы в баке рекомендуется разделять перегородкой, высота которой составляет 2/3 высоты уровня масла. Наличие такой перегородки позволяет отстояться маслу, сливаемому из гидросистемы.

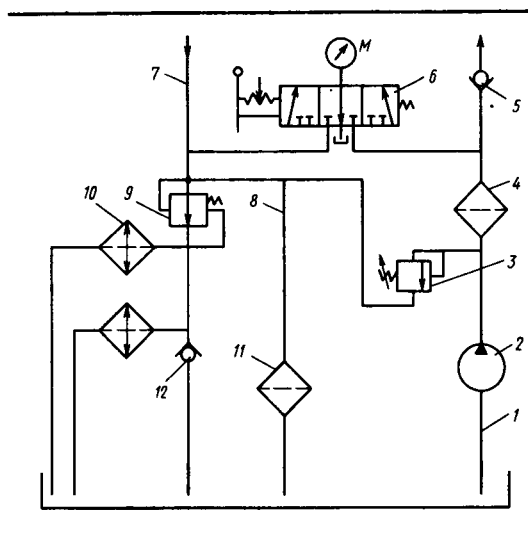


Рис. 187. Гидросхема насосной установки

Всасывающая и сливная трубы должны быть опущены глубоко в масло так, чтобы концы труб не доходили до дна 2/3 их диаметра. При таком расположении даже при значительном понижении уровня масла в баке всегда будет обеспечено всасывающее действие насоса, а засасывание отстоя со дна бака исключается.

На рис. 187 представлена гидросхема типовой насосной установки Г48-22. В баке установки содержится 60 л масла. Насос 2 через всасывающую трубу 1 подает масло через фильтр 4 и обратный клапан 5 в магистраль нагнетания. Фильтр 4 установлен последовательно после насоса, предохраняет все агрегаты гидросистемы от загрязнения, его рассчитывают на высокое давление. Давление масла в гидросистеме регулируется переливным клапаном 3. Потоки масла, выходящие из гидросистемы и из переливного клапана 3, объединяются в трубе 7, проходят через клапан противодавления 9, устанавливающий давление 0,2 МПа перед фильтром 11 тонкой очистки (к которому масло проходит по трубе 8). Фильтр установлен параллельно насосу, и через него проходит только часть потока масла из сливной трубы.

Поток масла, сливающийся через клапан 4, поступает в радиаторы 10, предназначенные для охлаждения и поддержания постоянной температуры. Для защиты радиаторов от перегрузки

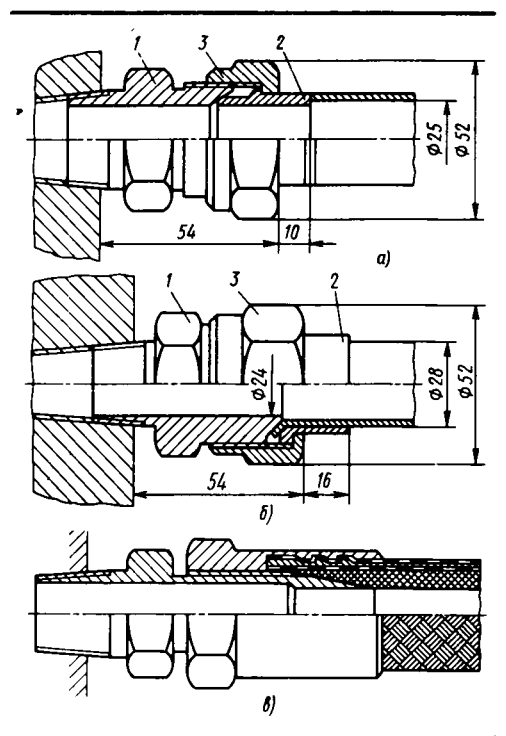


Рис. 188. Присоединительная арматура трубопроводов;

1 — штуцер; 2 — накидная гайка; 3 — втулка

параллельно с ними установлен обратный клапан 12, обеспечивающий давление масла на входе в радиаторы не выше 0,15 МПа. В насосной установке установлен манометр, подключаемый через специальный распределитель 6 к магистралям нагнетания или слива. В нейтральном положении распределитель отключает манометр М от системы во избежание его быстрого выхода из строя.

Для соединения отдельных элементов гидросистемы применяют стальные бесшовные и медные трубы и рукава высокого давления или шланги. Трубы меж-

ду собой и с гидроаппаратами соединяют с помощью арматуры (рис. 188).

Тонкостенные стальные трубы могут быть соединены с шаровым присоединительным наконечником сваркой (рис. 188, а). Возможно соединение без сварки — с помощью врезных колец. Медные трубы развальцовываются (рис. 188, б). Соединение шлангов происходит с помощью наворачивающейся муфты с крупной левой резьбой (рис. 188, в). Такая заделка шланга обеспечивает его надежную работу при давлении до 10 МПа. Диаметры труб выбираются исходя из максимально допустимых скоростей течения масла: при всасывании 1,2 м/с, при сливе 2 м/с при нагнетании 3—5 м/с. При течении масла по трубопроводу различают два потока: ламинарный и турбулентный.

При течении масла по трубе с малой скоростью частицы масла движутся по прямым линиям, параллельным направлению потока, так что тепловые потери на трение масла минимальны, — этот режим называют ламинарным. Режим течения масла характеризуется критическим числом Рейнольдса Re.

Если критическое число $Re < 2300$, имеет место ламинарный режим. Обычно всегда стремятся в трубопроводах гидросистемы создавать ламинарный режим. Потери давления при ламинарном режиме течения масла по трубопроводу можно определить по формуле

$$\Delta p = 8 \frac{\gamma Q l}{d^4},$$

где γ — кинематическая вязкость масла; Q — расход масла; l — длина трубопровода; d — внутренний диаметр трубопровода.

Трубопроводы должны располагаться в станке в местах, где исключена возможность их механического повреждения, в местах, допускающих легкость монтажа.

Глава 24 Агрегаты и аппаратура гидро- и пневмосистем станков

§ 1. Насосы и гидромоторы гидросистем станков

В гидросистемах, обеспечивающих различные циклы движения рабочих органов станков, применяют разнообраз-

ные агрегаты и аппаратуру, обеспечивающие нормальную эксплуатацию в течение длительного периода времени. К числу таких агрегатов относят насосы, гидромоторы, гидро- и пневмоцилиндры, гидроусилители, аппаратуру

управления, агрегируемую в виде панелей, и другие сложные распределительные и управляющие устройства. От надежности работы этих агрегатов зависит надежность работы гидросистемы и всего станка в целом. Гидравлические и пневматические агрегаты целесообразно монтировать в виде модулей, соединенных друг с другом без соединительных труб. Такой способ монтажа позволяет уменьшить сопротивление каналов, увеличить КПД системы, упростить конструкцию и монтаж агрегатов в станках.

Насос является главным рабочим органом гидросистемы станка, преобразующим механическую энергию в гидравлическую. Во время работы насос выполняет две функции: во-первых, он создает разрежение (вакуум) во всасывающем трубопроводе, достаточное для подсоса масла из бака; во-вторых, он направляет это масло на выход и далее в магистральный трубопровод гидросистемы.

Насосы характеризуются производительностью Q_n и давлением p_n . Производительность насоса (л/мин) — это количество масла, которое насос подает в единицу времени при определенной скорости вращения. Кроме того, в качестве характеристики насоса используют объемную постоянную насоса — количество масла, подаваемое насосом за один оборот вала (см³/об).

Насос может создать поток масла, необходимый для поддержания опреде-

ленного давления p_n в магистрали гидросистемы. При изменении давления в насосе изменяются внутренние утечки и, следовательно, его производительность, поэтому величину производительности Q_n обычно указывают при определенном давлении. Отношение производительности Q_n насоса, работающего под давлением p_n , к производительности Q_0 при давлении, равном 0, называют объемным КПД насоса ($\eta_{об}$). Объемный КПД увеличивается с увеличением объемной постоянной, частоты вращения вала насоса и вязкости масла. Если объемная постоянная насоса является переменной (регулируемый насос), то объемный КПД является также величиной переменной:

$$\eta_{об} = \frac{Q_n}{Q_0} = \frac{Q_0 - Q_y}{Q_0} = 1 - \frac{Q_y}{Q_0},$$

где Q_y — утечки масла в насосе.

При работе насоса кроме внутренних утечек, определяемых величиной $\eta_{об}$, имеются также потери на механическое трение его деталей и гидравлическое сопротивление каналов насоса потоку масла, проходящему через каналы. Эти потери характеризуются механическим ($\eta_{мех}$) и гидравлическим (η_r) КПД. Общий КПД насоса $\eta_n = \eta_{об} \eta_{мех} \eta_r$.

В станках в основном применяют пластинчатые, поршневые и шестеренные насосы.

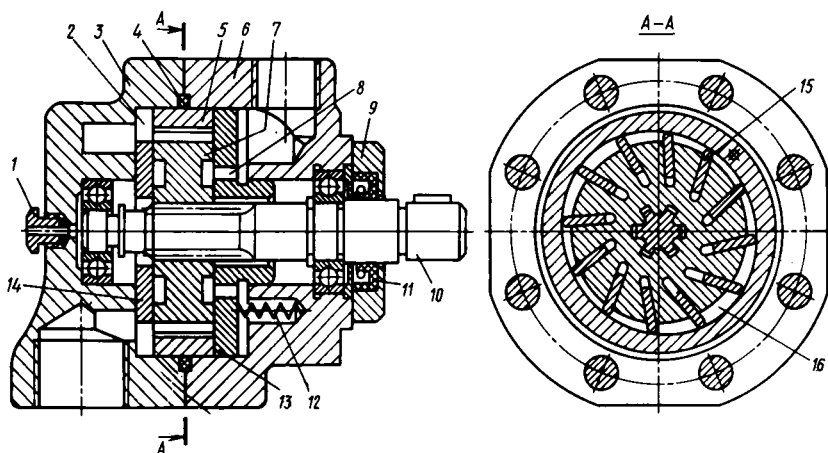


Рис. 189. Пластинчатый насос

На рис. 189 представлена конструкция пластинчатого насоса типа Г12-2 двойного действия и постоянной производительности разгруженной конструкции. Между чугунным корпусом 6 и крышкой 3 смонтирован статор 5, по внутренней поверхности которого скользят пластины 15, свободно перемещающиеся в радиальных пазах ротора 7. Ротор установлен на шлицевом валу 10, вращающемся в шарикоподшипниках. К торцам статора 5 и ротора 7 прижаты распределительные диски 13 и 14, в которых имеются два окна для нагнетания масла. При вращении ротора 7 пластины под действием центробежной силы и давления масла, подведенного под их торцы из напорной магистрали, через отверстие 8 прижимаются к внутренней поверхности статора 5. Камеры между пластинами соединяются с окнами всасывания 2 в тот момент, когда в соответствии с профилем кривой статора, очерченной спиралью Архимеда, объем этих камер увеличивается, и с окнами нагнетания 16, — когда объем уменьшается. Таким образом, насос обеспечивает подачу масла из всасывающей магистрали в напорную. За один оборот вала 10 каждая камера дважды производит всасывание и нагнетание масла. Уплотнение корпуса и крышки осуществляется кольцом 4, и уплотнение вала — манжетой 11, установленной в крышке 9.

Для уменьшения торцовых зазоров диск 13 выполнен плавающим, он

Таблица 16

Пластинчатые насосы с номинальной частотой вращения 960 об/мин и рабочим давлением 6,3 МПа

Насос	Номинальная производительность, л/мин	Мощность, кВт	η_n	$\eta_{об}$
			%	
Г12-21А	5	1,1	55	73
Г12-21	8	1,6	60	78
Г12-22А	12	1,9	70	81
Г12-22	18	2,8	76	85
Г12-23А	25	3,6	80	89
Г12-23	35	4,35	84	92
Г12-24А	50	7,0	80	89
Г12-24	70	9,0	82	90
Г12-25А	100	13,5	85	92
Г12-25	140	18,0	82	93
Г12-26А	200	24,5	87	95

прижимается к статору и ротору сначала пружинами 12, а затем давлением масла в напорной магистрали. Утечки из насоса отводятся через отверстие в штуцере 1. Насосы типа Г12-2 можно подобрать по табл. 16.

Расчетную производительность ($\text{см}^3/\text{мин}$) пластинчатого насоса определяют по формуле

$$Q_{н.р.} = \frac{2bn}{10^6} \left[\pi (R^2 - r^2) - \frac{(R - r)Sz}{\cos \alpha} \right],$$

где b — ширина ротора, мм; n — частота вращения вала насоса, об/мин; R, r — большая и малая полуоси статора, мм, S — толщина пластины, мм; z — число пластин в насосе, шт.; α — угол наклона пластины, град.

В пластинчатых насосах на одном валу можно устанавливать два ротора. Такие насосы называются сдвоенными, они подают в гидросистему два отдельных потока масла, которые можно использовать для питания различных участков гидросистем, имеющих разное давление ($p_{н1}$ и $p_{н2}$). При использовании сдвоенных пластинчатых насосов можно осуществить ступенчатое изменение производительности путем подключения к напорной магистрали насоса меньшей производительности (I ступень), насоса большей производительности (II ступень) и двух насосов одновременно (III ступень).

Для подачи масла под высоким давлением (20 МПа и более) в гидросистемах станков применяют радиально- и аксиально-поршневые насосы. Эти насосы имеют простую форму рабочих элементов (цилиндр и поршень), что позволяет их изготовить с высокой точностью. В них легко осуществляется изменение производительности и направление подачи потока масла. В станках аксиально-поршневые насосы находят преимущественное распространение, так как они значительно меньше по размерам, в несколько раз легче по весу и имеют более высокий КПД.

Схемы действия аксиально-поршневых насосов приведены на рис. 190, а. При вращении ротора 4 от вала 1, поршень 3 (рис. 190, а), взаимодействующий с неподвижной наклонной шайбой 2, совершает возврат-

схема гидромотора типа МГ-154. Ротор, установленный на вращающемся валу 1, разделен на две части: цилиндрический блок 6 с поршнями 7 и барабан 2 с толкателями 9. Такое разделение позволяет ротору самоустанавливаться в процессе работы гидромотора и устранять перекося поршней.

В наклонной расточке корпуса размещен упорно-радиальный шарикоподшипник 10, на который опираются толкатели 9. Ротор концентрично расположен в корпусе и опирается на распределительно-опорный диск, имеющий каналы 11 и 12 для подвода и отвода масла. В барабане расположены пружины 3, поджимающие цилиндрический блок 6 к диску. В диске имеются полукольцевые каналы, разделенные двумя перемычками. По одному каналу масло от отверстия 4 подводится к ротору, а по другому — отводится.

При работе гидромотора масло, поступающее через соответствующий полукольцевой паз к окнам на торце ротора, воздействует на поршень 7, находящийся напротив этого паза, вследствие чего связанные с поршнем толкатели 9 выдвигаются и поджимаются к подшипнику 10. Возникающие тангенциальные силы вращают толкатели вместе с барабаном, валом 1 и цилиндрическим блоком 6. Одновременно толкатели, находящиеся напротив полукольцевого паза, соединенного со сливом, выдвигаются и выталкивают масло в этот паз. Крайние положения толкателей соответствуют положению их против перемычек, разделяющих полукольцевые пазы.

Частота вращения вала 1 гидромотора определяется расходом масла. При изменении направления потока масла, т. е. при подведении его в полукольцевой канал 12, через который масло отводилось, происходит реверс гидромотора. Пренебрегая зависимостью КПД гидромотора от его нагрузки, можно считать, что момент, развиваемый двигателем, пропорционален давлению в гидросистеме.

Работоспособность торцового распределения обеспечивается особенностями конструкции гидромотора. Эти особенности заключаются в том, что ротор имеет возможность самоустанавливаться на опорно-распределительном диске с тем, чтобы разгрузить торцовое распределение от действия сил, воз-

никающих в связи с перекосами из-за неточности изготовления или сборки.

Для обеспечения самоустановки ротора и разгрузки торцовой опорной поверхности применен ротор, состоящий из двух частей: блока 6 и барабана 2. Барабан установлен на валу на шпонке 8, а блок 6 — свободно, он центрируется узким пояском. Во вращение блок приводится поводком, входящим в паз барабана. Благодаря такой конструкции толкатели контактируют с поршнями, передают на них, а следовательно, и на ротор только осевые силы. Силы, создающие момент вращения, передаются на вал 1 гидромотора через толкатели и барабан. Наличие сквозного вала 1 позволяет осуществлять поворот вручную. Для удобства присоединения вал 1 имеет на конце лыски 5. Через отверстие внутри вала 1 проходит масло для смазки толкателей 9. Поворотом заглушки 4 можно удалить воздух, проникший в гидромотор.

§ 2. Гидро- и пневмоцилиндры

Для осуществления поступательного движения в станках используют гидро- и пневмоцилиндры. По конструкции их можно разделить на цилиндры с двусторонним штоком, с односторонним штоком и с плунжером.

На рис. 192 приведены схемы гидроцилиндров, обеспечивающих возвратно-поступательное движение исполнительного рабочего органа 6 станка (стол, суппорт, ползун). Движение осуществляется при подаче масла к поршням 2 (по трубопроводам 1 или 4 в цилиндр 3).

Стол 6 (рис. 192, а) совершает движения в противоположные стороны с одинаковыми скоростями (подачами). Корпус цилиндра 3 неподвижен. Штоки 5, имеющие одинаковые диаметры d , работают на растяжение. Это позволяет сделать штоки небольшого диаметра. Однако здесь требуется точно изготовить цилиндр, выполнить двойные уплотнения штоков и уплотнения поршня. Кроме того, возрастает длина $L=3l$, где l — длина хода поршня 2.

Масло по трубопроводам 1 и 4 подается в цилиндр в верхних точках для того, чтобы обеспечить свободный выход воздуха из полостей. Если при движе-

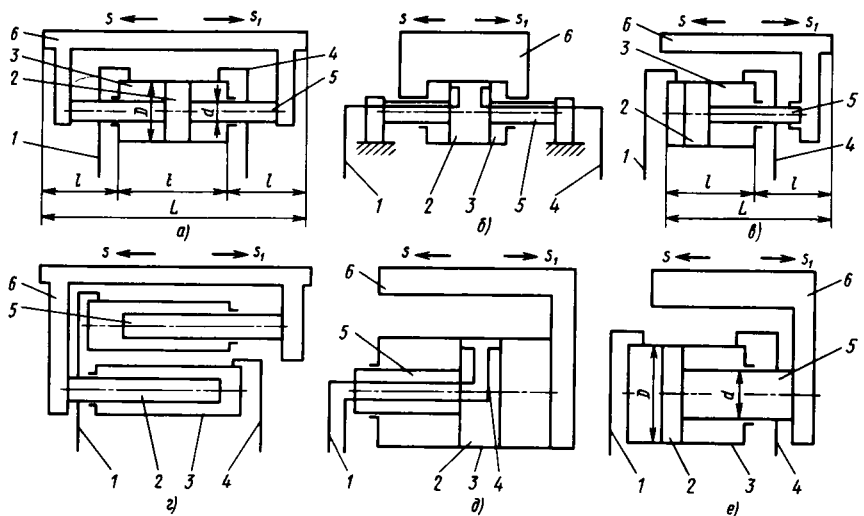


Рис. 192. Схемы гидроцилиндров

нии вправо и влево в цилиндр поступает равное количество масла Q , то скорость движения стола 6

$$s = s_1 = \frac{1000 Q}{0,785 (D^2 - d^2) 60},$$

где Q — расход масла, поступающего в цилиндр, л/мин; D — диаметр цилиндра, мм; d — диаметр штока, мм.

Такие цилиндры применяются главным образом в станках шлифовальной группы.

В цилиндрах, выполняемых по схеме рис. 192, б, шток неподвижно закреплен на станине, а корпус жестко связан со столом 6 станка. Масло в цилиндр поступает через отверстия в штоке.

Гидроцилиндр, показанный на рис. 192, в, имеет односторонний тонкий шток, что позволяет значительно уменьшить размеры цилиндра и получить приблизительно одинаковые скорости движения в обе стороны. Эти цилиндры используют в станках, где шток работает на растяжение.

Для упрощения технологии изготовления цилиндров и уменьшения стоимости агрегата цилиндры выполняют так, как показано на рис. 192, г. В этом случае внутреннюю поверхность цилиндров не обрабатывают. Плунжеры

2 и 5 выполняют пустотелыми, и если они имеют одинаковый диаметр, скорости перемещения стола в обе стороны одинаковы. Длина хода стола 6 при таких конструкциях цилиндра может достигать 8 м.

В многорезцовых и копировальных токарных полуавтоматах, а также в агрегатных станках для перемещения силовых головок применяют цилиндры, выполненные по схеме рис. 192, д. Здесь корпус цилиндра 3 жестко связан с рабочим органом станка, а шток, через который подводится масло, жестко закреплен на станине.

Если необходимо получить одинаковые скорости движения штока в обе стороны, применяют дифференциальные цилиндры (рис. 192, е). В этих цилиндрах при движении поршня 2 влево, правая полость соединяется с напорной магистралью, а левая — со сливной, а при движении вправо обе полости через распределитель соединяются с напорной магистралью. При этом масло, вытесняемое из правой полости, поступает в левую полость вместе с маслом, подаваемым насосом. Такие цилиндры применяют в хонинговальных станках.

$$\text{При движении влево } s = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)}$$

При движении вправо (выдерживая

условия дифференциальности и считая, что $\frac{\pi D^2}{4} = 2 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$;

$$s_1 = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}} + \frac{s_1 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)}{\frac{\pi}{4} D^2} =$$

$$= \frac{Q}{2 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)} + \frac{s_1 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)}{2 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)}.$$

Отсюда

$$s_1 = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)} = s.$$

Если в таком дифференциальном цилиндре уменьшить диаметр штока 5, можно получить очень высокие скорости s . Такую конструкцию используют в протяжных, поперечно-строгальных и долбежных станках.

Типовая конструкция пневмоцилиндра приведена на рис. 193. Основной деталью цилиндра является труба (гильза) 1, изготовляемая из стали 45. Торцовые поверхности трубы закрыты крышками 5, изготовленными из стали или чугуна. Соединение крышек 5 и гильзы уплотняют круглыми резиновыми кольцами 4. Внутри гильзы помещен чугунный поршень 3, который прикреплен к штоку 6 гайкой. Стальной шток 6 опирается на втулку 8. Уплотнение штока соединения с крышкой обеспечивается манжетами, прижимаемыми втулкой 7. Силу прижима можно регулировать прокладками. Для уплотнения сопряжений между поршнем 3 и гильзой служат поршневые манжеты 2 или чугунные поршневые кольца.

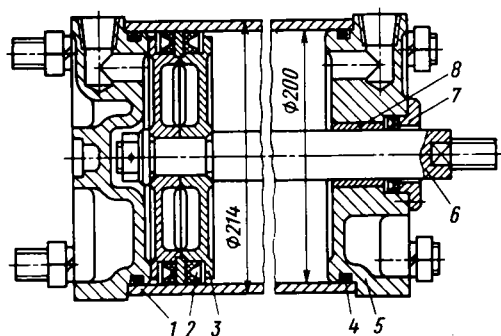


Рис. 193. Пневмоцилиндр

§ 3. Гидроусилители и аппаратура управления

В приводах механизмов подачи станков используют гидравлические усилители мощности и момента вращения. Они позволяют усилить слабый сигнал с задающего устройства до величины, способной приводить в движение рабочий орган станка. Гидроусилители применяются в копировальных, программных устройствах станков, а также в устройствах синхронизации движений, создания колебательных движений и многих других устройствах.

На рис. 194, а представлена схема копировального устройства с гидроусилителем мощности. Такими устройствами оснащаются станки токарного типа. От насоса 1 под давлением, определяемым настройкой клапана, масло через фильтр 2 и распределитель поступает в гидроцилиндр 8. В зависимости от формы профиля копира 14, жестко установленного на станине, смещается золотник 5. При его переме-

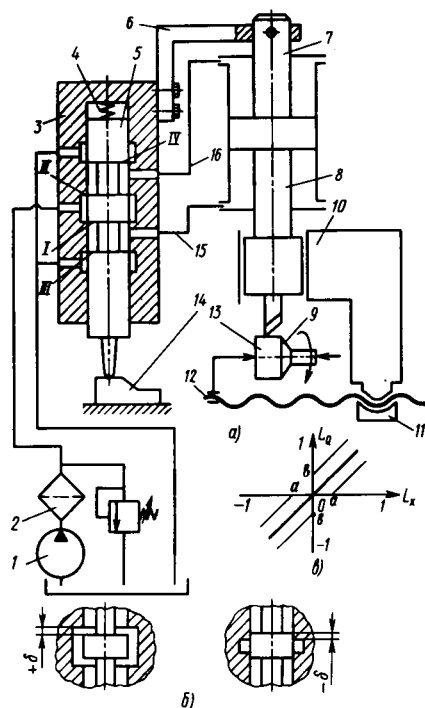


Рис. 194. Схема копировального суппорта с гидроусилителем

щении вверх кромка I открывает доступ маслу в нижнюю полость цилиндра 8. Шток 7 поднимается вверх и вытесняет масло из верхней полости цилиндра через кромку IV распределителя, а суппорт 10 с резцом отводится вверх. При смещении золотника 5 под действием пружины 4 вниз открывается доступ маслу в верхнюю полость цилиндра через кромку II по трубе 16. Масло из нижней полости по трубе 15 через кромку III сливается в бак. Суппорт 10 при этом движется вместе с резцом к центру вращающейся заготовки 13. Если заготовка вращается, а следовательно, вращается и ходовой винт 12, то салазки 11 перемещаются вдоль обрабатываемой заготовки, а суппорт 10, управляемый по копиру 14, профилирует соответствующую форму обрабатываемой заготовки 9. Следовательно, продольное движение салазок осуществляется механическим приводом, а поперечное движение — гидрокопировальным устройством. Так как корпус 3 распределителя жестко связан со штоком 7 через рычаг 6, всякие отклонения суппорта 10 от заданного копиром положения приводят к соответствующему изменению величины щели гидрораспределителя, а следовательно, к изменению давления в полостях гидроцилиндра, что приводит всю копировальную систему в нейтральное положение, при котором кромки золотника I—IV закрывают щели.

Гидрокопировальные устройства позволяют обеспечить высокую точность обработки деталей (до 0,02 — 0,05 мм на диаметр), а также быструю переналадку с одной детали (сменой копира). При работе с такими устройствами можно автоматизировать обработку ступенчатых валов сложного профиля. Копир выполняют из нежестких материалов (листовая сталь, пластмасса и т. д.). Сила P , действующая на золотник, приблизительно равна 1Н. Сила R , возникающая при резании, равна сотням Ньютонов. Коэффициент усиления гидроусилителя $K = \frac{R}{P}$. Этот коэффициент может быть очень высок: $K = 100 \div 10\,000$. Поскольку жесткая обратная связь направлена на уменьшение сигналов рассогласования в распределителе (она направлена на уменьшение величины смещения рабочих

кромки золотника 5) она называется отрицательной единичной обратной связью.

При изготовлении следует стремиться, чтобы кромки I—IV золотника 5 совпадали с кромками корпуса 3, образуя «нулевое» перекрытие (перекрытие $\delta = 0$). Если это условие не выполнено, то образуется «положительное» перекрытие $+\delta$, когда ширина поршня I—II больше на величину δ , и «отрицательное» перекрытие $-\delta$, когда ширина поршня I—II меньше расточки в корпусе 3 (рис. 194, б). На графике (рис. 194, в), построенном в координатах $L_Q = f(L(x))$:

$$L_x = \frac{x}{x_{\max}}, \quad L_Q = \frac{Q}{Q_{\max}},$$

где x , $x_{\max}$ — текущее и максимальное смещения золотника; Q , $Q_{\max}$ — текущий и максимальный расход масла через золотник.

При положительном перекрытии возникает зона a — a нечувствительности, а при отрицательном перекрытии зона b — b неустойчивости. В практике эти зоны необходимо уменьшать, т. е. приближаться к «нулевому» перекрытию.

В процессе работы гидроусилителя расходуется давление p_n , развиваемое насосом (рис. 195, а). Это давление идет на преодоление потерь на кромках золотника (Δp_1 и Δp_2), рабочей нагрузки (давление p) и давление слива p_{cl} :

$$p_n = \Delta p_1 + \Delta p_2 + p_{cl} + p.$$

Если принять, что $\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p$, а давление слива $p_{cl} = 0$, то $p_n = 2\Delta p + p$, откуда $\Delta p = \frac{1}{2}(p_n - p)$.

На рис. 195, б представлен график, построенный по этому уравнению. При $p = 0$ $\Delta p = \frac{1}{2} p_n$, а при $p = p_n$ $\Delta p = 0$. Это говорит о том, что Δp — величина переменная, и для определения оптимальной Δp необходимо определить КПД усилителя:

$$\eta = \frac{N}{N_{\max}} = \frac{Qp}{612 Q_n p_n} = \frac{Q}{Q_n} \frac{p}{p_n} = L_Q L_p,$$

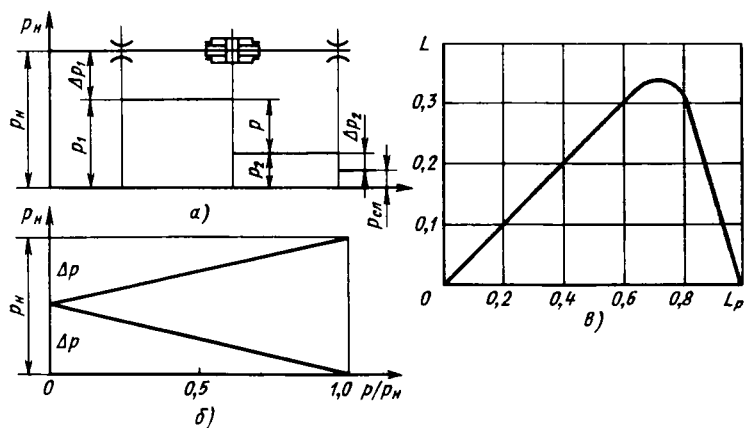


Рис. 195. Графики работы гидроусилителя

где N , $N_{\max}$ — соответственно полезная и затраченная мощности; $L_p = \frac{p}{p_n}$.

Взяв производную от этого выражения и приравняв ее нулю, построим график, характеризующий величину КПД усилителя. Из графика (рис. 195, в) видно, что максимальный КПД усилителя равен 0,38, при этом $p = 2/3 p_n$. Остальная часть затраченной мощности расходуется на нагрев масла. Следовательно, при проектировании устройств, включающих гидравлический усилитель мощности, необходимо учитывать возможность отвода тепла, образующегося в процессе эксплуатации гидроустройства.

На базе аналогичного гидроусилителя построен гидропривод, обеспечивающий линейное шаговое перемещение рабочего органа станка (рис. 196). Масло под давлением p_n поступает

в полость 5 цилиндра 3 и через отверстие 4 подходит к рабочим кромкам золотника (ширина винта равна диаметру отверстия 4). Если шаговый электродвигатель 2 повернет винт на небольшой угол, виток приоткроет отверстие 4 и масло направится либо в полость 5 цилиндра, что позволит штоку 7 переместиться на один шаг вправо, либо в полость 6 и на слив ($p_{сл}$), и шток переместится на один шаг влево. Дренажное отверстие 1 сливает утечки масла в бак. Такая конструкция усилителя имеет небольшие габаритные размеры и обеспечивает шаг перемещения 0,01—0,02 мм за один сигнал шагового двигателя.

На рис. 197 представлена схема роторного шагового гидропривода с электроуправлением. Сигнал от программы подводится на шаговый электродвигатель 2 через проводник 1.

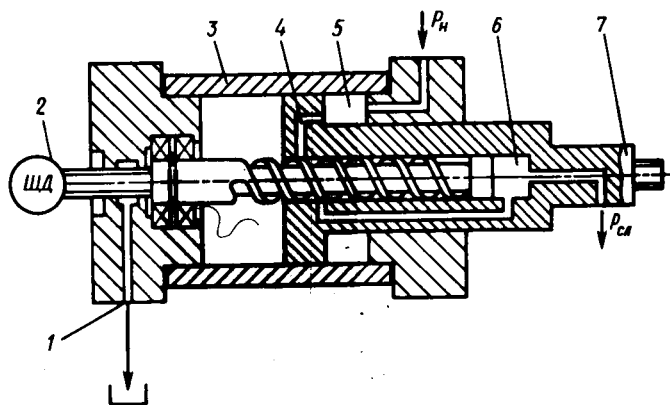
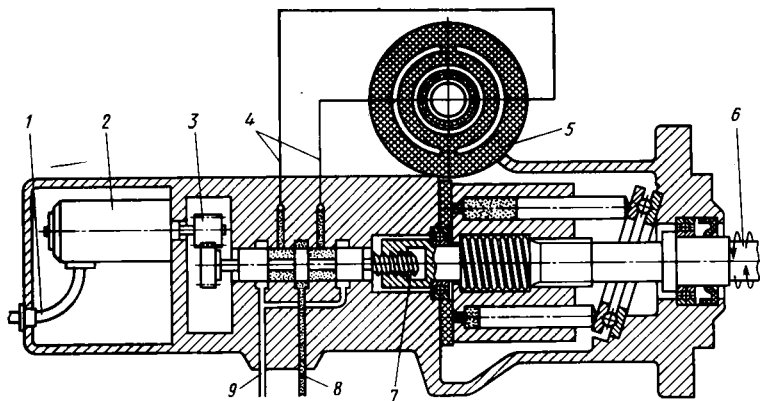


Рис. 196. Линейный шаговый гидропривод

Рис. 197. Роторный шаговый гидропривод



Двигатель поворачивается за один сигнал на угол $1,5^\circ$ и через зубчатую передачу 3 поворачивает распределитель, к которому подведено масло по трубе 8. Масло сливается по трубе 9.

При повороте распределителя масло по трубам 4 через торцовый распределитель 5 подходит к поршням гидромотора, выходной вал 6 которого, поворачиваясь также на угол $1,5^\circ$, винтом 7 возвращает распределитель в исходное положение. Рассмотренный привод используют как роторный шаговый привод, обеспечивающий шаг перемещения, равный $0,02$ мм.

В роторных электрогидравлических приводах трудно получить стабильные малые подачи. Это происходит вследствие колебаний величины утечек и перетечек в гидромоторах. На рис. 198 представлена принципиальная схема привода, в котором этот недостаток

устранен стабилизацией низких частот вращения гидромотора. В гидромоторе 1 и электрогидроусилителе (ЭГУ) 8 установлены два стабилизирующих клапана 3 и системы W_{oc} обратной связи по скорости 9, выходным звеном которой является датчик 2 низких оборотов. Привод приводит в движение стол 6 и фрезу 4. Заготовка 5 укрепляется на столе 6, а привод жестко связан с ходовым винтом 7 станка. Скорость вращения вала гидромотора 1 зависит от расхода масла, который определяется работой гидроусилителя от заданного сигнала $U_{зад}$ и сигнала обратной связи U_{oc} , которые суммируются на обмотке катушки усилителя. При малой частоте вращения n расход масла в гидромоторе может оказаться равным количеству утечек из распределителя. Для снижения n используют клапан 3, с помощью которого

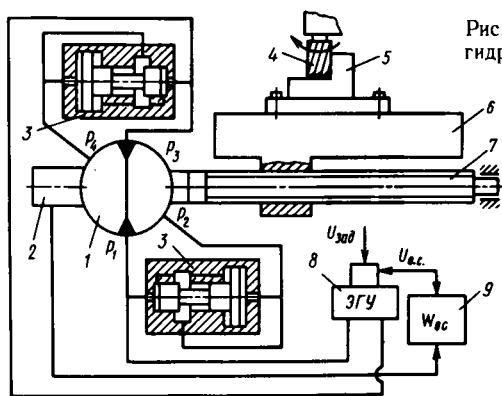
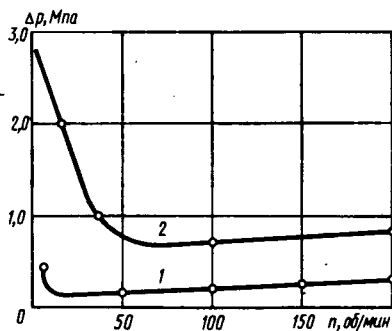


Рис. 198. Гидрораспределитель с электрогидроуправлением



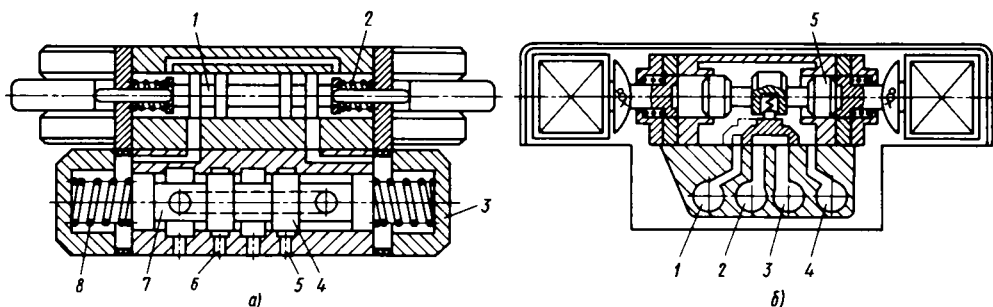


Рис. 199. Пневмораспределители

давление в полости подпора поддерживается равным давлению p_1 в полости распределения. На низких частотах вращения это равенство сохраняется. Если частота вращения уменьшится, то клапан 3 сработает (сместится влево и откроет щель, через которую масло поступит в полость подпора), и $p_1 = p_2$ и $p_3 = p_4$. Поддержание давления в полости подпора равным давлению в полости распределения ведет к уменьшению утечек масла из распределителя в несколько раз. Использование такой схемы стабилизации позволяет снизить частоту вращения на 30%. Из графика (рис. 198), характеризующего зависимость $\Delta p = f(n)$, видно, что для гидромотора (кривая 1) стабилизированная частота вращения начинается с 25 об/мин, а без стабилизации (кривая 2) начинается с 80 об/мин.

Для управления направлением потока масла в гидро- и пневмосистемах применяют распределительные устройства. По типу управления эти устройства можно классифицировать на распределители с электроуправлением, гидроуправлением, с управлением от кулачка и с ручным управлением.

По способу присоединения к гидросистеме распределители могут быть с непосредственным присоединением труб к корпусу на конической резьбе (при $Q \leq 140$ л/мин), с фланцевым присоединением (при $Q > 140$ л/мин).

На рис. 199, а показан распределитель с электрогидравлическим управлением. Золотник 7 размещен в чугунном корпусе и поддерживается с двух сторон в среднем положении пружинами 3, 8, расположенными в крышках. В нейтральном положении камеры, где расположены пружины 3, соединены между собой. Камеры 5 и

6 соединены с полостями цилиндра. Через отверстие 4 масло под давлением попадает в обе рабочие камеры. При включении правого электромагнита верхний золотник смещается влево. Масло при этом проходит в левую камеру основного золотника 7 и смещает его вправо. Масло от насоса по отверстию 4 проходит через канал 5 в рабочую полость цилиндра, а из обратной полости цилиндра оно сливается через канал 6 в бак. Если включить левый электромагнит, то масло пройдет под правый торец основного золотника 7, он сместится влево, и масло от насоса пройдет в канал 6 и далее в обратную полость рабочего цилиндра. При этом осуществляется реверс рабочего органа станка. Масло из обратной полости сливается через канал 5 в бак.

На рис. 199, б представлен пневмораспределитель с электромагнитным управлением. Отверстие 4 распределителя соединяется с магистральной трубой. В зависимости от положения золотника 5 воздух проходит в пневмоцилиндр либо через отверстие 1, либо через отверстие 3, а через отверстие 2 осуществляется выхлоп воздуха.

§ 4. Основные методы расчета клапанов

При расчете гидросистемы определяют силы, действующие на рабочий орган станка, расход рабочей жидкости, мощность на валу насоса и др. Общими является расчет и подбор уплотнений, выбор насоса, регуляторов скорости, клапанов и т. п.

При расчете клапана учитывают распределение давления, характер потока,

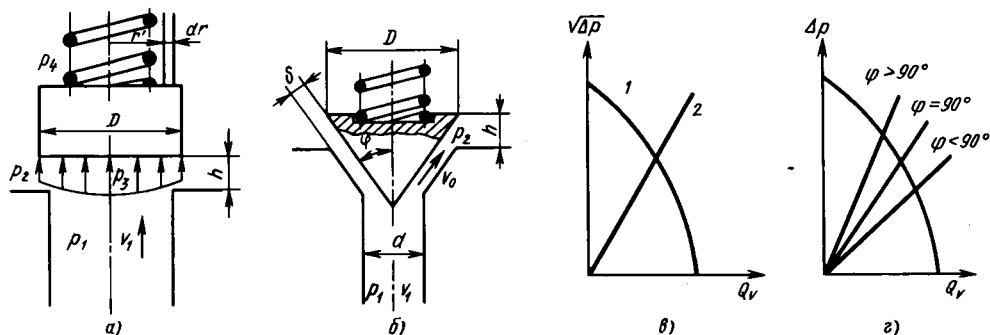


Рис. 200. Расчетная схема клапанов

силы инерции, жесткость пружины, форму замыкающей части и другие параметры.

Рассмотрим расчет плоского клапана, обеспечивающего регулирование давления в гидросистеме (рис. 200). Перепад давления в клапане Δp определяют из уравнение равновесия клапана (рис. 200, а):

$$\beta \Delta p \frac{\pi d^2}{4} = \int_0^{D/2} (p_2 - p_1) 2\pi r dr,$$

или

$$\beta \Delta p \frac{\pi d^2}{4} = R_0 + Ch - T_n, \quad (164)$$

где β — коэффициент, характеризующий равномерность распределения давлений p_3 и p_4 ; d — диаметр отверстия в клапане; D — диаметр поршня; R_0 — усилие пружины при $h=0$; C — жесткость пружины; h — подъем клапана; T_n — сила инерции жидкости, действующая на клапан;

$$T_n = \frac{d(mv)}{dt} = v \frac{dm}{dt} = vQ + vQ_v \rho = \rho \frac{Q_v^2}{\frac{\pi d^2}{4}},$$

где m — масса поршня; v — скорость течения жидкости в канале; Q — максимальный расход жидкости через клапан; Q_v — объемный расход жидкости через клапан, $Q_v = \pi d h v_0$, здесь $v_0 = \mu \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p}$ — ско-

рость истечения жидкости через рабочее сечение клапана; μ — коэффициент расхода; ρ — плотность жидкости.

Подставив выражения для h , T_n в уравнение (164), получим

$$\beta \Delta p \frac{\pi d^2}{4} = R_0 + C \frac{Q_v}{\pi d v_0} - \rho \frac{Q_v^2}{\frac{\pi d^2}{4}},$$

или

$$\beta \Delta p \frac{\pi d^2}{4} + \rho \frac{Q_v^2}{\frac{\pi d^2}{4}} = R_0 + \frac{C Q_v}{\pi d \mu} \sqrt{\frac{\rho}{2 \Delta p}}. \quad (165)$$

Для упрощения выражения (165) введем обозначения:

$$\Delta p^2 = x; \quad \beta \frac{\pi d^2}{4} = \frac{1}{a^2}; \quad R_0 = c_1^2; \\ Q_v = y; \quad \frac{\rho}{\pi d^2} = \frac{1}{b^2}; \quad \frac{C}{\pi d \mu} \sqrt{\frac{\rho}{2}} = c_2.$$

Подставив их в уравнение (165), получим

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = c_1^2 + c_2 \frac{y}{x}.$$

Разделив это выражение на два уравнения, получим возможность графически исследовать работу клапана:

$$\frac{x^2}{(Ka)^2} + \frac{y^2}{(Kb)^2} = 1, \quad (166)$$

$$y = \frac{K^2 - c_1^2}{c_2} x, \quad (167)$$

где K — параметр, характеризующий клапан.

На рис. 200, б показано графическое решение системы уравнений (166) и (167). Выражение (166) представляет собой уравнение эллипса 1 с центром в начале координат и осями, совпадающими с координатными осями, а выражение (167) — уравнение прямой 2, проходящей через начало координат. Координаты точки пересечения эллипса 1 и прямой 2 есть решения системы уравнений (166) и (167).

Анализируя рассмотренное, можно сделать вывод: при закрытом клапане, т. е. при $Q_v = 0$, $K = c_1 = \sqrt{R_0}$ и $x^2 = a^2 K^2$, тогда $\Delta p = \frac{R_0}{\beta \frac{\pi d^3}{4}}$.

Отсюда, при закрытом клапане

$$\beta = 1 + \frac{p_2}{p_1 - p_2} \left[\left(\frac{D}{d} \right)^3 - 1 \right],$$

а при $\frac{D}{d} = 1$ $\beta = 1$. Это означает, что давление будет распределено равномерно по всей торцовой поверхности поршня клапана.

В гидросистемах агрегатных станков применяют конические клапаны (рис. 200, в). Рассмотрим расчет такого клапана:

$$T_n = \frac{d(mv)}{dt} = v\rho \frac{\pi d^3}{4} (v - v_0 \cos \varphi),$$

где ρ — плотность масла; v_0 — скорость масла на выходе из клапана.

Так как $v_0 \delta \pi d = v \frac{\pi d^2}{4}$ для небольших значений t (рис. 200, в), то $\frac{v_0}{v} = \frac{d^4}{4\delta}$.

Подставляя $\frac{v_0}{v} = \frac{d}{4\delta}$ и $v = \frac{Q_v}{\frac{\pi d^2}{4}}$ в уравнение для определения T_n , получим

$$T_n = \frac{Q_v \rho}{\frac{\pi d^3}{4}} \left(1 - \frac{d}{4\delta} \cos \varphi \right).$$

Так как $\delta = h \sin \varphi$,

$$T_n = \frac{Q_v^2 \rho}{\frac{\pi d^3}{4}} \left(1 - \frac{d}{4h} \operatorname{ctg} \varphi \right).$$

Расход масла через клапан

$$Q_v = v_0 \pi d h \sin \varphi.$$

После подстановки T_n и Q_v в уравнение (165) равновесия получим

$$\beta \Delta p \frac{\pi d^3}{4} = R_0 + Ch - \frac{Q_v^2 \rho}{\frac{\pi d^3}{4}} \left(1 - \frac{d}{4h} \operatorname{ctg} \varphi \right).$$

Так как $h = \frac{Q_v}{v_0 \pi d \sin \varphi}$, а $v_0 = \mu \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$, последнее выражение сведем к следующему:

$$\beta \Delta p \frac{\pi d^3}{4} + \frac{Q_v^2 \rho}{\frac{\pi d^3}{4}} \left(1 - \frac{d}{4h} \operatorname{ctg} \varphi \right) = R_0 + C \frac{Q_v}{\pi d \mu \sin \varphi} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}. \quad (168)$$

Примем

$$\Delta p = x^2; \quad \beta \frac{\pi d^3}{4} = \frac{1}{a^2}; \quad R_0 = c_1;$$

$$Q_v = y; \quad \frac{\rho}{\frac{\pi d^3}{4}} = \frac{1}{b^2};$$

$$c_2 = \frac{C}{\pi d \mu \sin \varphi} \sqrt{\frac{\rho}{2}}.$$

Подставив эти значения в уравнение (168), получим

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \left(\frac{d}{4h} \operatorname{ctg} \varphi \right) = c_1^2 + c_2 \frac{y}{x},$$

или

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = c_1^2 + yx\mu_1 + \frac{y}{x}c_2,$$

где $\mu_1 = \mu \sqrt{2\rho \cos \varphi}$.

Последнее уравнение представим в виде трех уравнений:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = K^2 = c_1^2 + yx\mu_1 + \frac{y}{x}c_2$$

или

$$\frac{x^2}{(Ka)^2} + \frac{y^2}{(Kb)^2} = 1, \quad y = \frac{K^2 - c_1^2}{x\mu_1 + \frac{c_2}{x}} = Lx.$$

Используя последние два уравнения, построим графическую характеристику клапана (рис. 200, з). Эллиптическая кривая характеризует зависимость перепада давления от расхода жидкости через клапан, а прямые характеризуют изменение угла φ конуса седла клапана.

Из графика видно, что для $\varphi = 90^\circ$ уравнение $y = Lx$ аналогично соответствующему уравнению плоского клапана,

следовательно, при конструировании рабочей части клапана лучше иметь плоский клапан (он проще конического). Кроме того, сила инерции жидкости, действующая на конический клапан, в значительной степени зависит от угла конуса седла клапана.

Для получения оптимальной статической характеристики клапана необходимо выбирать эластичную пружину с незначительным коэффициентом жесткости, плоский замыкатель ($\varphi \rightarrow \pi/2$) и коэффициент расхода $\mu \approx 1$.

§ 5. Гидропанели

Гидропанели предназначены для реверсирования скоростей, пуска и останова шлифовальных станков, а также для управления механизмами, работающими во время реверса. Гидропанели могут применяться в строгательных, долбежных, зубообрабатывающих, протяжных, агрегатных станках и автоматических линиях с различными циклами работы. Гидропанели имеют распределитель, переключение которого осуществляется регулируемыми упорами, установленными на рабочем органе станка, дроссель, регулирующий скорость движения рабочего органа станка, и специальный кран для пуска и останова рабочего органа и разгрузки

насоса, а также фильтры, клапаны и вспомогательные устройства.

Рассмотрим цикл периодической подачи шлифовальной бабки, управляемой от гидропанели (рис. 201). Вращение винта подачи осуществляется от зубчатого колеса 1 через обгонную муфту (или храповый механизм). Зубчатое колесо 1 приводится во вращение поступательно движущимся поршнем 2, левая полость которого постоянно соединена с напорной магистралью, а правая через специальный распределитель — с отверстием 8 или 5 гидропанели 11. При реверсе стола через отверстие 8 канал 7 соединяется с напорной магистралью, а канал 6 через отверстие 5 — со сливной магистралью. Из канала 7 масло поступает в правую полость гидроцилиндра и перемещает поршень 2 влево, осуществляя подачу шлифовальной бабки. Одновременно через демпфер (дроссель) 9 масло поступает в левую торцовую камеру 10 распределителя, заставляя его двигаться вправо. При этом масло из камеры 3 вытесняется через демпфер 4 в сливную магистраль. Когда распределитель переместится влево, он соединит правую полость гидроцилиндра со сливной магистралью, и поршень 2 гидроцилиндра возвратится в исходное положение. Таким образом, во время движения стола в одну сторону поршень 2 совершает один двойной ход.

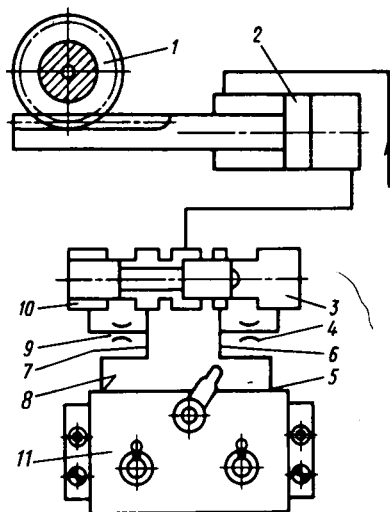


Рис. 201. Схема гидропанели

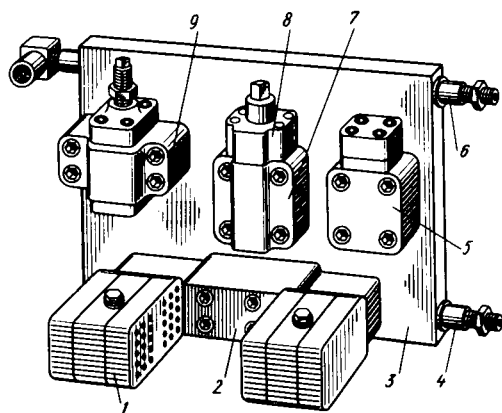


Рис. 202. Компоновка гидропанели

При реверсе стола канал 6 соединяется с напорной магистралью, а канал 7 со сливной, и цикл движения повторяется. Ход поршня 2 можно регулировать демпферами 4 и 9. Этот механизм обеспечивает подачу шлифовальной бабки после каждого реверса стола.

Компоновка гидромеханизмов и аппаратуры в гидропанели позволяет значительно упростить гидросистему и уменьшить длину каналов, сократить длину соединительных трубопроводов. На рис. 202 приведена гидропанель, скомпонованная из отдельных аппаратов, присоединенных к одной общей плите 3. Внут-

ри плиты имеются отверстия, которые подводят масло к распределителю 2, управляемому электромагнитами 1. К гидропанели масло поступает от насоса через входное устройство 4, а в силовой цилиндр — через трубопроводы, подсоединенные к штуцерам 6. Контрольно-регулирующие устройства 5, 7, 8 и 9 плотно присоединены к плите. Это позволяет обеспечить хорошую герметичность. Применение гидропанелей позволяет осуществить соединение аппаратов без помощи труб, что значительно упрощает и удешевляет монтаж, демонтаж и сборку гидросистемы.

Глава 25 Гидро- и пневмосистемы станков

§ 1. Гидросистемы шлифовальных станков

Усложнение конструкции станков привело к расширению функций, выполняемых гидравлическими устройствами, а это, в свою очередь, — к увеличению числа агрегатов, управляемых гидравлической системой.

Если проследить процесс развития гидропривода, то нетрудно заметить, что с ростом конструктивной сложности, мощности и расширением выполняемых функций на станке неуклонно возрастает и сложность применяемого гидравлического оборудования, что вызывает соответствующие трудности в обеспечении его надежной работы. В связи с этим повышаются требования, предъявляемые к гидроприводу станков: повышение надежности и долговечности работы элементов и гидросистемы в целом; обеспечение высоких динамических характеристик различных элементов гидроприводов, обеспечение плавности реверса рабочих органов станков за счет выбора оптимальных параметров реверсирующих устройств; уменьшение энергетических потерь; повышение КПД гидроприводов, поддержание постоянной температуры рабочей жидкости, установление в гидросистеме необходимого давления для обеспечения нормальной работы станка; улучшение удобств обслуживания и гидрооборудования для различных моделей станков.

Гидросистемы в шлифовальных станках применяют для осуществления возвратно-поступательного перемещения стола, подачи шлифовального круга, автоматического подвода и отвода шлифовальной бабки и для выполнения вспомогательных функций. Гидропривод состоит из следующих основных элементов: панели, предназначенной для управления движением стола, моторов и насосной станции, обеспечивающей питание гидросистемы маслом.

На рис. 203 представлена гидросистема шлифовального станка. Стол 22 станка получает возвратно-поступательное движение от гидроцилиндра 21, масло в которой поступает под давлением, регулируемым клапаном 20, от насоса 19. В корпусе гидропанели 11 размещен реверсивный распределитель 18, предназначенный для обеспечения реверсирования потока масла, направляемого в гидроцилиндр и распределитель управления 9. При движении стола масло через распределитель 18 и протоки гидропанели проходит к правой полости гидроцилиндра. Из левой полости гидроцилиндра масло вытесняется через распределитель 18 и далее через протоку, образуемую правым конусом распределителя управления 9 и расточкой корпуса 11, в бак. Стол будет двигаться, пока правый упор не повернет рычагом управления штангу 10 с зубчатым колесом. Зубчатое колесо при повороте переключит распределитель управления 9, который, перемещаясь влево,

своим правым конусом постепенно перекроет выход масла из левой полости гидроцилиндра. При этом произойдет плавное торможение стола.

При движении влево масло поступает под левый торец распределителя 18 и в камеру 8, а правый торец распределителя 18 и камеры 13 соединены с линией слива, благодаря чему распределители 9 и удерживаются в правом положении. В процессе торможения рычаг управления поджимается к упору. В конце пути торможения стол через рычаг управления и штангу 10 с зубчатым колесом переводит распределитель 9 через среднее положение, при этом камера 13 соединяется с магистралью давления, а камера 8 — с линией слива, и создается нагрузка, дополнительно перемещающая распределитель управления 9 из среднего положения в крайнее левое. Одновременно масло под давлением подается к правому торцу распределителя 18, а камера под левым торцом соединяется со сливом, вследствие чего распределитель 18 перемещается влево.

При перемещении распределителя 18 из крайнего правого положения в среднее, масло под давлением подается к его правому торцу через обратный клапан 15 и дроссель 17, расположенные в боковой плите 12, а масло из левой торцевой камеры сливается свободно, минуя дроссель 2, расположенный в боковой плите 5. При проходе распределителя 18 среднего положения происходит реверс стола и открывается канал, позволяющий свободно подвести масло к правому торцу распределителя, минуя дроссель 17. Одновременно перекрывается канал, по которому масло свободно выходило из левой торцевой камеры распределителя 18, и теперь вытесняемое масло должно проходить через дроссель 2 и обратный клапан 3. Регулированием дросселя 2 (регулированием его живого сечения) можно изменять скорость движения распределителя 18 при его перемещении из среднего положения в левое, что обеспечивает требуемую плавность разгона стола независимо от настройки дросселя 17. Изменения пауз при реверсе и регулирования плавности разгона вправо достигают регулирования дросселей 1 и 16.

На первой половине пути распределителя 9 он кинематически связан со столом, при этом масло сливается сво-

бодно из торцовых полостей. После перехода через среднюю точку распределитель одним из крайних цилиндрических поясков перекрывает выход масла из камеры, образуемой внутренними поверхностями втулки 7, плунжером 6 и торцом распределителя. На второй половине пути распределителя 9 масло из этой полости вытесняется через радиальный зазор между втулкой 7 и распределителем 9, чем достигается торможение и мягкое перемещение этого распределителя. Таким образом, дроссели 1 и 17 служат для регулирования паузы при реверсировании распределителя, а дроссели 2 и 16 — для регулирования плавности разгона. Обратные клапаны 3 и 14, 4 и 15 служат для блокировки дросселей.

Для плавного реверсирования стола необходимо выдержать определенные соотношения между площадью поршня гидроцилиндра, размерами тормозных конусов золотника управления и передаточным отношением механизма переключения. Исходными данными для выбора рабочей площади цилиндра,

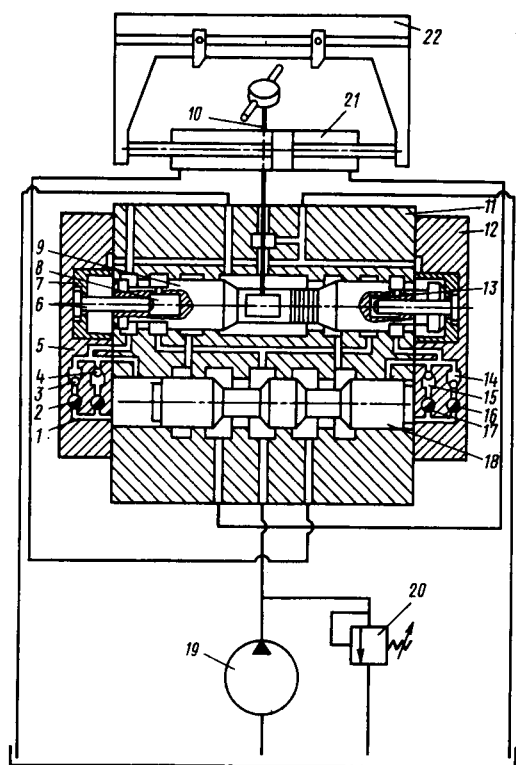


Рис. 203. Гидросхема шлифовального станка

размером распределителя, конструкции и размеров механизма переключения являются вес подвижных частей стола и максимальная скорость его возвратно-поступательного движения.

§ 2. Гидросистемы копировальных станков

Гидросистема копировального станка содержит механизмы, обеспечивающие точное и согласованное во времени взаимодействие рабочих и вспомогательных агрегатов. Для обеспечения четкой работы гидросистемы копировального станка необходимо обеспечить надежную работу следящего привода, от качества работы которого зависят точность и производительность эксплуатируемого станка. Гидравлическим следящим приводом называют автоматическую систему, с помощью которой на управляемом рабочем органе станка в виде определенной выходной величины воспроизводится изменение входной величины, задаваемой копиром произвольной формы. Гидравлический следящий привод преобразует входное движение, задаваемое копиром, в исполнительное движение, согласованное со входным движением по величине перемещения, его скорости и направленности. Гидравлические следящие приводы открывают широкие возможности

автоматизации станков. Конструкция лучших гидравлических следящих приводов достигла такого совершенства и экономичности, что их применяют не только для обработки фасонных криволинейных форм, но и для обработки простых форм деталей, например ступенчатых валов.

На рис. 204 по направляющим станины 11 от гидроцилиндра 1 ведущей подачи перемещается суппорт 8. На суппорте закреплен гидроцилиндр 7 следящей подачи, перемещающий поперечные салазки 8 вместе с резцом 10 и корпусом 6 копировального прибора. Распределитель копировального прибора прижимается пружиной к копиру 5, установленному на станине 11. При работе привода масло от насоса под давлением подводится в заднюю полость гидроцилиндра 1. Масло из копировального прибора сливается в бак через дроссель 3, перепад давления на котором p_1 воздействует на торцовую поверхность площадью f_1 клапана автоматического регулятора 2. Масло из гидроцилиндра 1 сливается в бак через дросселирующую кромку регулятора 2 и дроссель 4. Перепад давления p_2 на дросселе воздействует на торцовую поверхность площадью f_2 золотника регулятора 2. Снизу клапан нагружен пружиной, развивающей усилие K . При

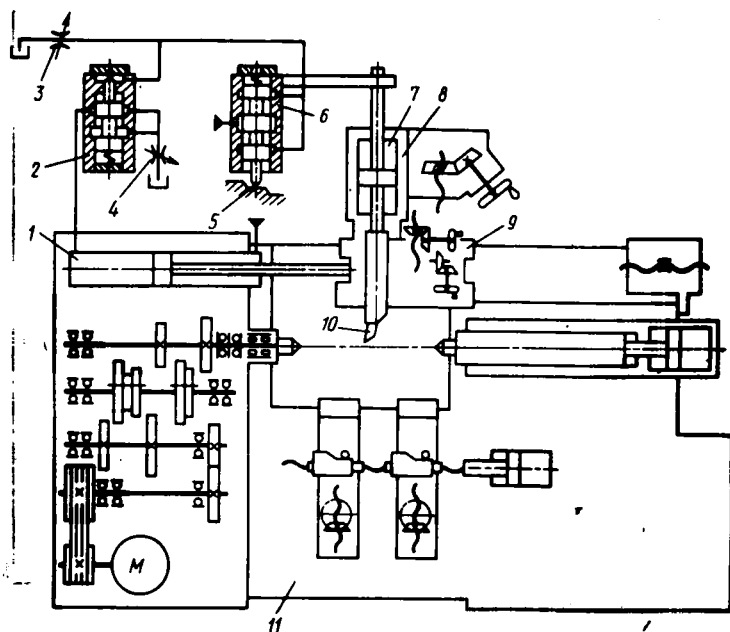


Рис. 204. Гидросхема копировального токарного полуавтомата мод. 1712

этом клапан находится в равновесии, характеризуемом условием

$$f_1 p_1 + f_2 p_2 = K.$$

При работе станка возникают следующие случаи обработки: 1) обработка цилиндрической части заготовки (этот момент показан на схеме); гидросистема работает как обычный привод с дросселем на выходе, ведущая подача $s_n \neq 0$, а следящая подача $s_{cl} = 0$; 2) обработка торцевой части детали, $s_n = 0$, $s_{cl} \neq 0$; 3) обработка конусной части детали, $s_n \neq 0$, $s_{cl} \neq 0$; работают оба гидроцилиндра, и резец 10 движется со скоростью результирующей подачи, при этом привод автоматически поддерживает постоянство результирующей подачи за счет изменения ведущей и следящей подач.

Для контурного копирования на вертикально-фрезерных станках применяют двухкоординатные копировальные устройства. Сложная контурная кривая на обработанной поверхности образуется в этом случае в результате геометрического сложения задающей и следящей подач. Направление контурной по-

дачи совпадает с направлением касательной к профилю копера в точке касания с ним шупа.

Гидросистема станка (рис. 205) состоит из насосной установки 1, от которой масло поступает через следящие распределители 2 и 13 в гидромоторы продольной подачи 3, и поперечной подачи 6. Гидромоторы приводят во вращение ходовые винты. Ходовой винт 5 продольной подачи при вращении сообщает столу станка поперечное перемещение.

На столе установлен копер 9, воздействующий на шуп 10 копировального прибора 12. Смещаясь, шуп передвигает вспомогательный распределитель 11 и пропускает масло к торцам следящего распределителя 13. При этом обеспечивается двухступенчатое управление распределителя 13, уменьшается нагрузка, необходимая для смещения распределителя, улучшается герметизация контактирующих поверхностей, уменьшаются утечки, повышается точность исполнения команд и уменьшается погрешность обработки.

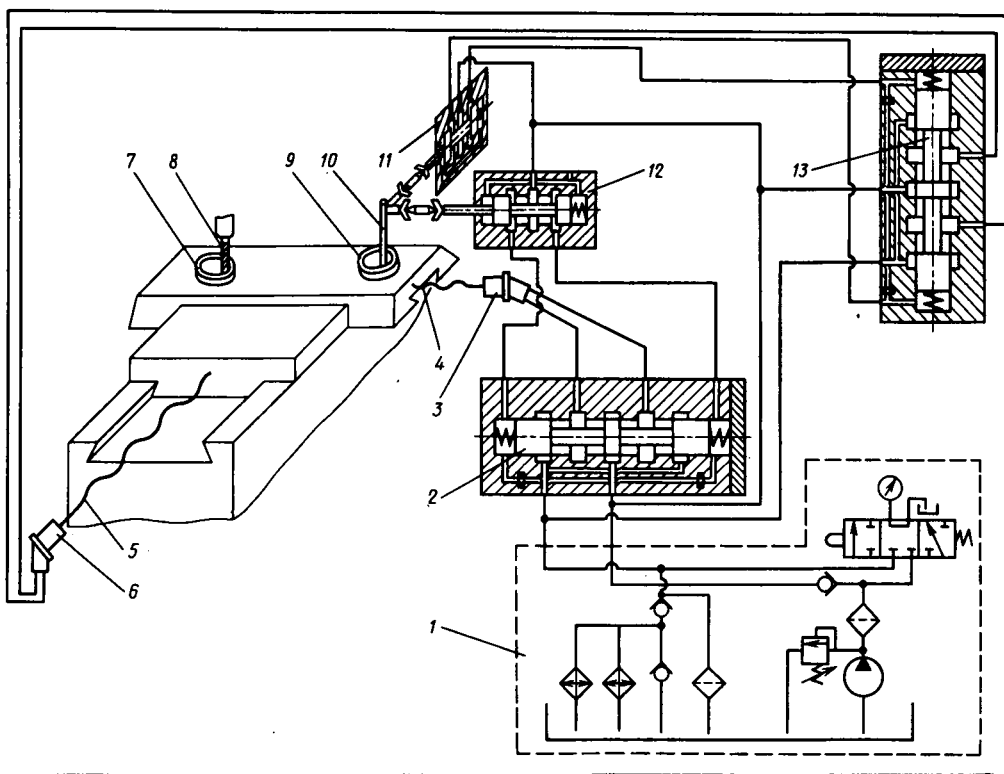


Рис. 205. Гидросхема двухкоординатного копирования вертикально-фрезерного станка

При движении стола в продольном направлении благодаря наличию выступов и впадин на копире 9 происходит его воздействие на вспомогательный распределитель 12, который управляет следящим распределителем 2. Следящий распределитель 2 смещается, и масло поступает к гидромотору 3, от которого приводится во вращение ходовой винт 4, сообщающий столу подачу в продольном направлении. Таким образом, укрепленная на столе заготовка 7 обходит вокруг вращающейся концевой фрезы 8. Применение гидропривода в данном случае позволяет уменьшить нагрузку на копир, сделать его нежестким, из легко обрабатываемого материала, что, в свою очередь, облегчает автоматизацию процесса обработки.

§ 3. Гидро- и пневмосистемы станков с программным управлением

Гидропривод обладает малой инерционностью подвижных частей, что обеспечивает его высокое быстродействие и дает возможность быстро реверсировать скорость и тормозить рабочий орган станка. Кроме того, привод имеет небольшую массу и габаритные размеры (в 4—10 раз меньше электропривода), обеспечивает плавный ход рабочих органов станков, особенно при использовании гидроцилиндров, отличается долговечностью и имеет простую и надежную конструкцию, позволяющую в короткое время произвести его отладку или устранить неисправности, возникающие в процессе эксплуатации. Все эти достоинства позволили гидроприводу получить широкое распространение в станках с программным управлением.

На рис. 206 приведены принципиальные схемы шаговых гидроприводов, используемых в механизмах подачи станков с программным управлением. Назначением гидроприводов является усиление импульсного сигнала, получаемого от программы, до величины, способной осуществить перемещение стола 1 станка. Приводы могут быть линейными (рис. 206, а) и роторными (рис. 206, б). В гидроприводах перемещение задается шаговым электродвигателем 5 либо винтовым распределителем 2 в линейных гидроприводах, либо на осевой распределитель 4 в роторных гидроприво-

дах. Исполнительным двигателем линейного шагового гидропривода является гидроцилиндр 3, шток которого связан со столом 1, а роторного гидропривода — гидромотор 3, который через ходовой винт 6 приводит в движение стол станка. Особенностью шагового гидропривода является то, что при подаче одного импульса на электродвигатель 5 стол станка перемещается на один шаг, равный 0,01—0,02 мм.

На рис. 207 представлена схема линейного шагового электрогидравлического привода с симметричной схемой управления. В качестве задающего устройства в приводе использован шаговый электродвигатель 1, что позволяет получить разомкнутую систему управления без датчика обратной связи. Шаговый электродвигатель 1 соединен редуктором 3 с управляющей втулкой 6, отверстия d_1 и d_2 которой образуют с кромками винта 5 переменные дроссели, имеющие проводимости G_3 и G_4 . Винт жестко соединен с кронштейном 4 со штоком исполнительного цилиндра 2. Масло подводится к отверстиям в управляющей втулке 6 и далее к винту 5 от насоса через постоянные дроссели проводимостью G_1 и G_2 .

При подаче управляющих импульсов на обмотки шагового двигателя втулка 6 поворачивается относительно кромок винта 5, изменяя тем самым гидравлические сопротивления G_3 и G_4 , вследствие чего на торцах следящего распределителя 7 образуется перепад давлений $\Delta p = p_1 - p_2$, заставляющий его сместиться и обеспечить требуемый расход масла для подачи в полость цилиндра 2. Поршень гидроцилиндра начнет смещаться, увлекая за собой жестко связанный с ним винт 5, обеспечивая внутреннюю единичную жесткую отрицательную обратную связь. Таким образом, каждому единичному дискретному действию на шаговый двигатель соответствует определенное смещение рабочего органа станка, определяемое по формуле

$$S = \frac{\varphi i P}{360},$$

где φ — угол поворота вала шагового двигателя, °; i — передаточное отношение редуктора; P — шаг винта-распределителя, мм.

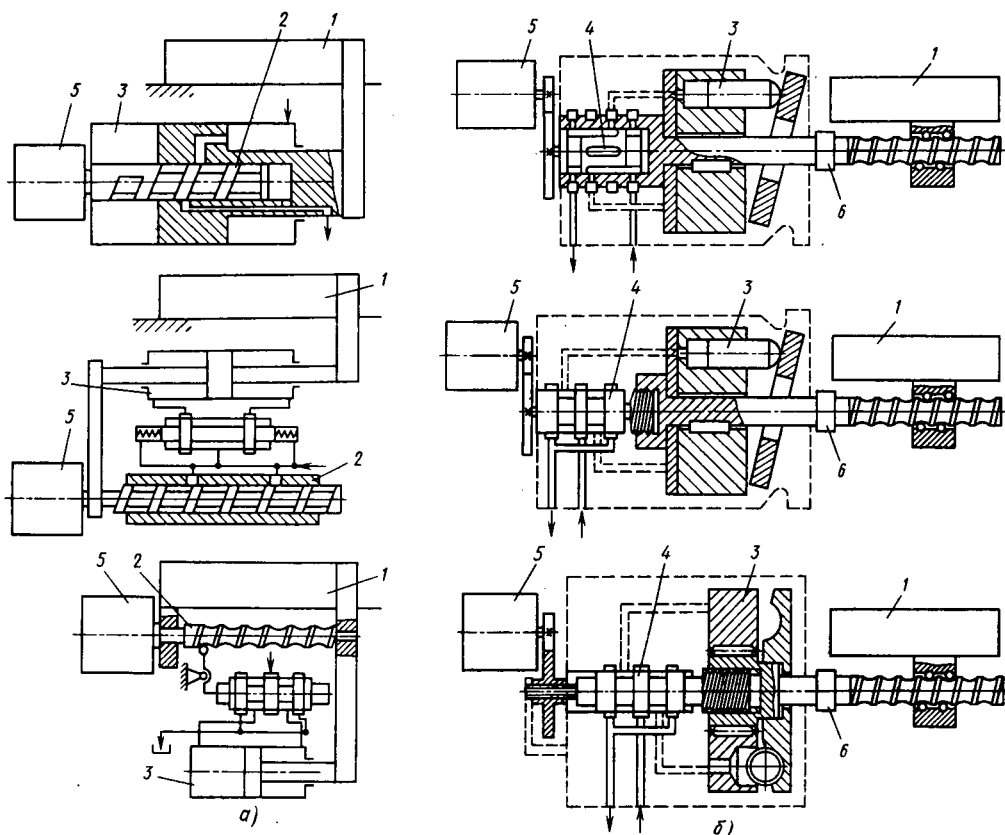


Рис. 206. Принципиальные схемы шаговых гидроприводов:
а — линейных; б — роторных

В тех случаях, когда требуется обеспечить поступательное перемещение рабочего органа станка, линейный привод имеет преимущество перед роторным благодаря тому, что он обеспечивает непосредственную передачу силы без трудоемких дорогостоящих механизмов, преобразующих один вид движения в другой.

На рис. 208 представлена схема роторного электрогидравлического шагового привода. Выходной вал 8 привода поворачивается синхронно с выходным валом шагового электродвигателя 1 при подаче одного импульса на его вход. Управляющий распределитель 5, размещенный в гильзе, расположен в корпусе. Управляющий распределитель 5 жестко связан в осевом направлении с резьбовым валиком 4 и может поворачиваться вокруг своей оси. Резьбовой валик 4 может свободно перемещаться в радиальном направлении относительно

управляющего распределителя 5, что компенсирует возможные неточности в расположении распределителя золотника и резьбового валика. Этот валик свя-

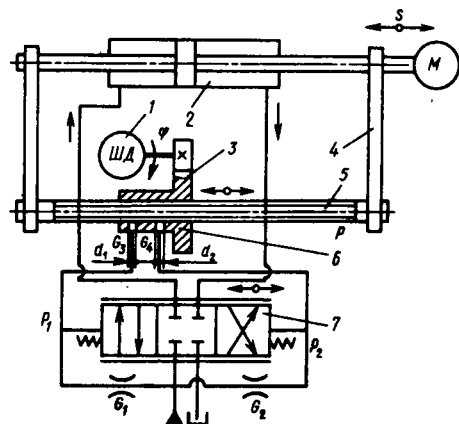


Рис. 207. Схема линейного электрогидравлического шагового привода

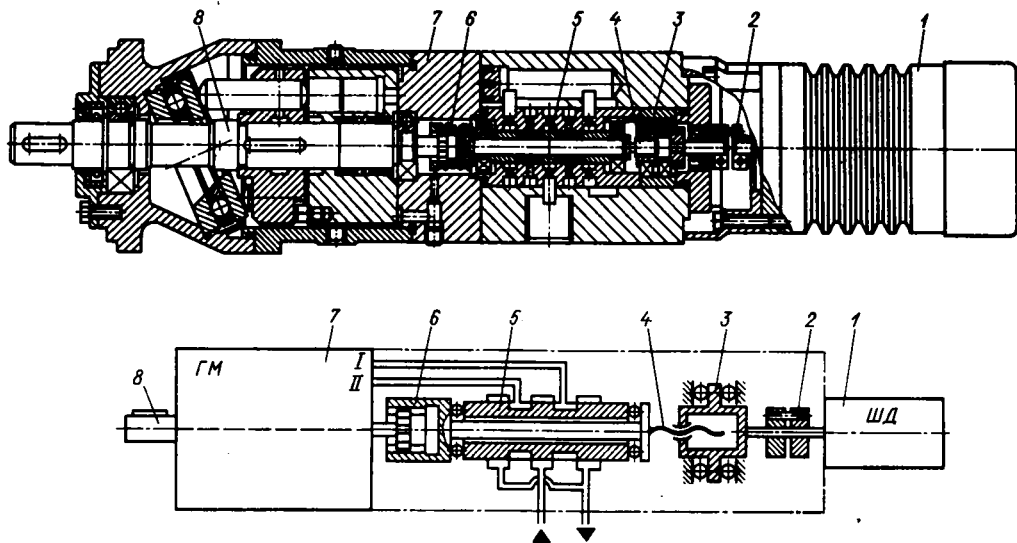
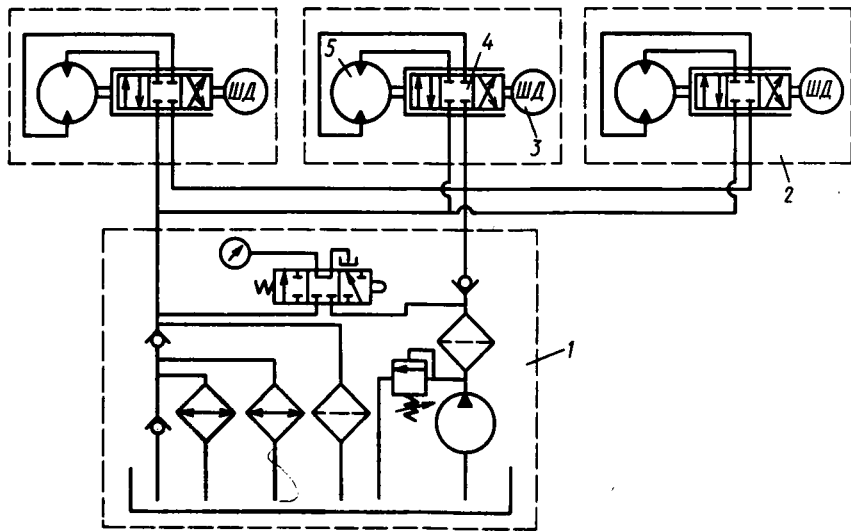


Рис. 208. Схема роторного электрогидравлического шагового привода

зан шлицевой втулкой 6 с валом 8 гидромотора 7.

Когда управляющий распределитель 5 находится в среднем положении относительно гильзы, в обе полости гидромотора поступает одинаковое количество масла и вал 6 не вращается. При повороте входного вала, жестко связанного со втулкой 3, имеющей винтовую нарезку, валик 4 перемещается в осевом на-

правлении вместе с управляющим распределителем 5 и соединяет полости гидромотора с гидросистемой так, что вал 8 вращается в том же направлении, что и входной вал. Вращаясь, вал 8 гидромотора 7 шлицевой втулкой 6 поворачивает валик 4, который ввертывается или вывертывается из втулки 3 и перемещается вместе с управляющим распределителем в обратном направле-



нии до тех пор, пока не займет среднее положение относительно гильзы, при котором произойдет остановка вала гидромотора. Для связи вала шагового электродвигателя 1 и вала гидродвигателя служит муфта 2, состоящая из поводка, закрепленного на валу винтами, и хомутика.

Уравнение вращения выходного вала привода имеет вид

$$J\ddot{\varphi} + M - M_n = 0,$$

где J — момент инерции привода; $\ddot{\varphi}$ — угловое ускорение выходного вала; M — момент вращения на входном валу привода; M_n — момент вращения на грузки.

$$M = \frac{q}{2\pi} (p_1 - p_2),$$

где p_1, p_2 — давления на входе и выходе; q — удельная постоянная гидромотора.

Наибольший момент, развиваемый гидромотором

$$M_{\max} = \frac{q}{2\pi} p,$$

где p — давление насоса.

На рис. 209 показана гидросхема вертикально-фрезерного станка с программным управлением мод. 6Р11Ф3. Гидросхема состоит из насосной установки 1 и гидроусилителей 2, два из которых служат для продольного и поперечного перемещения стола, а третий — для вертикального перемещения. Гидроусилители моментов состоят из шаговых электродвигателей 3, управляющего распределителя 4 и гидромоторов 5.

В зависимости от характера подаваемых на гидроусилитель импульсов вал гидромотора получает правое или левое вращение и соответственно в ту или иную сторону перемещает рабочий орган станка. Применение гидроусилителей позволяет останов или реверс рабочих органов осуществлять без предварительного замедления скорости, что упрощает составление программы, управление движением и исключает необходимость в контроле перемещений.

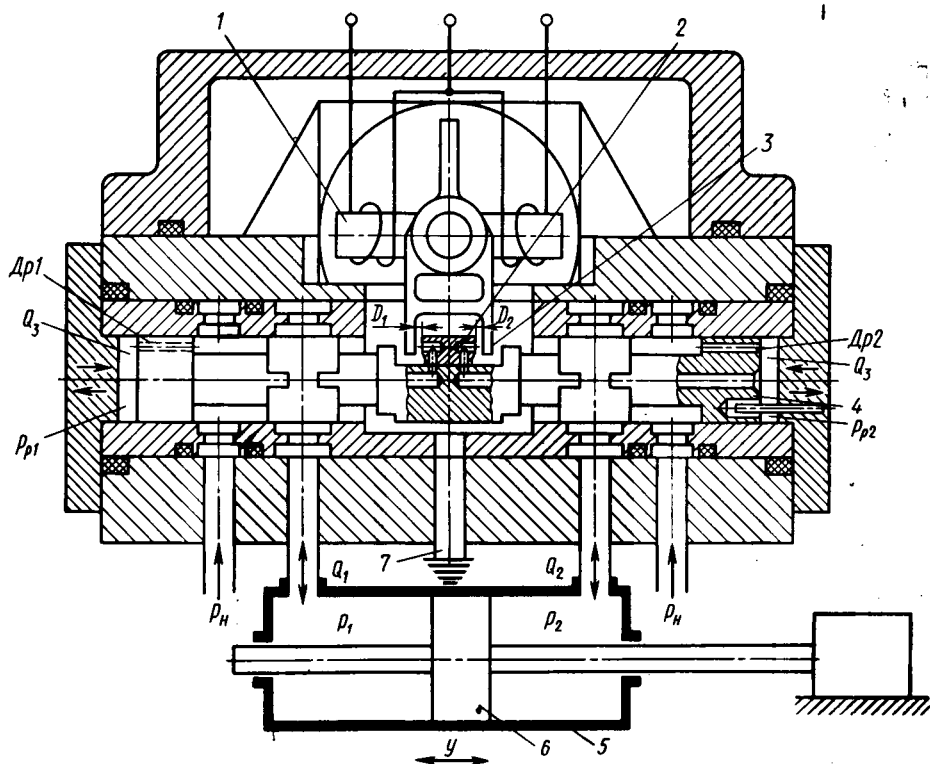


Рис. 210. Гидросхема перемещения стола станка с двухступенчатым усилителем типа сопло-шланк

На рис. 210 представлена гидросхема перемещения стола станка, оснащенная двухступенчатым гидроусилителем типа сопло-заслонка. Сигнал от программы подается на электромеханический преобразователь, который отключает якорь 1, удерживающий в равновесии распределитель 2 за счет масла, выходящего из дросселей 3. Масло под давлением p_n поступает через распределитель в гидроцилиндр 5 и через поршень 6 приводит в движение стол станка. Равновесие распределителя 2 поддерживается давлением масла p_1 и p_2 , находящимся под торцами распределителя 4.

При подаче сигнала от программы на якорь 1 изменяются диаметры D_1 и D_2 отверстий дросселей, поэтому изменяются и давления p_{p1} и p_{p2} . Распределитель 2, допустим, смещается вправо, масло от насоса в объеме Q_1 поступает в гидроцилиндр 5, создает давление p_1 , поршень 5 перемещается в направлении y , создавая противодействие p_2 , под которым поток масла Q_2 сливается в бак через центральную часть распределе-

ля и отверстие. Для устойчивой работы золотника в нем предусмотрены дроссельные отверстия $Др1$ и $Др2$, создающие потоки масла Q под торцами распределителя 2. Рассмотренная гидросистема обеспечивает хорошую и устойчивую работу стола, высокий коэффициент усиления, минимальную стоимость, высокое быстродействие и простоту конструкции.

Подобный двухступенчатый усилитель использован в гидросистеме эрозионного станка для подачи электрода (рис. 211).

От насосной станции 30 по магистрали 27 через кран пуска и останова 28 рабочая жидкость под давлением поступает по магистрали 27 и 22 в канал 20 и полость цанги 6. Приподнимаемая обоймой цанги 9 и сжимая при этом пружину 8, жидкость освобождает шток 7 с электродом-инструментом 1. Одновременно через фильтр 19 и дроссель 18 жидкость поступает под торец распределителя 21 и через канал 17, прикрытый торцом иглы, — заслонки 16, уходит на слив по трубе 11. Со второй стороны распределитель 21 поджат пружиной 24. Для уменьшения трения распределитель 21 приводится в постоянное вращение турбинкой 23, масло в которую поступает по трубе 25 через редукционный клапан 26 и уходит на слив по трубе 11. Распределитель 21 осуществляет через трубы 5 и 10 управление перемещением штока 7, перемещающимся в шариковых направляющих с дренажной трубкой 3.

Для подвода к детали в систему встроен распределитель 4, при переключении которого обе полости поршня соединяются между собой, и поршень опускается под собственным весом.

В гидростанции предусмотрены теплообменник 2, распределитель 29 для контроля давления перед фильтром грубой очистки 31.

При изменении межэлектродного зазора δ изменяется напряжение питания на катушке управления 15, и меняется сила взаимодействия между магнитным полем катушки 15 и магнитным полем постоянного магнита 14 с магнитопроводом 13. Нарушается равновесие сил между электромагнитной равнодействующей, действующей на катушку, и пружиной 12. Катушка 15 устанавливается в новое положение равновесия;

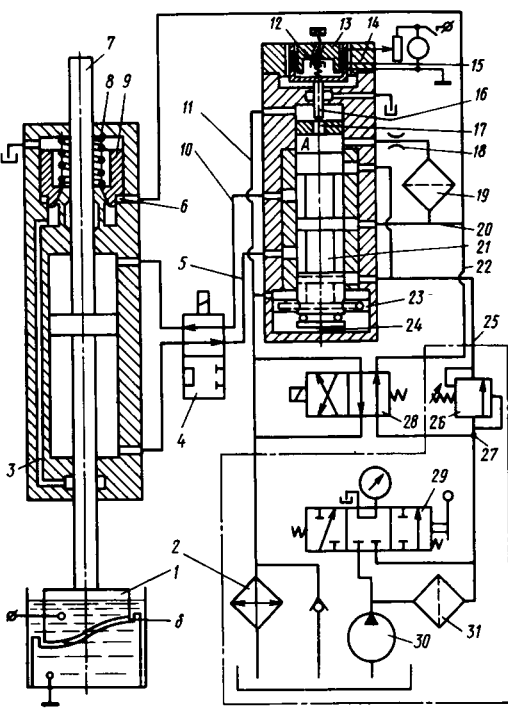


Рис. 211. Гидросистема управления эрозионного станка

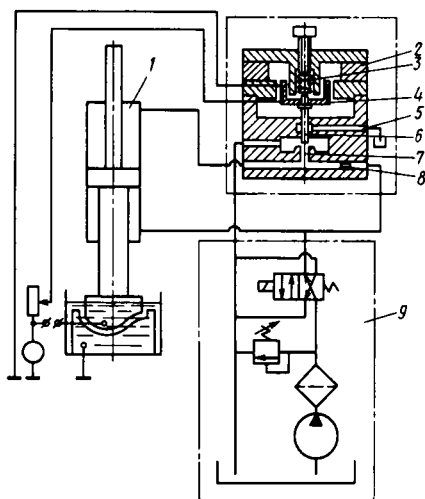


Рис. 212. Следящий привод подачи электрода эрозионного станка с одноступенчатым несимметричным усилителем

вместе с ней перемещается жестко соединенная игла-заслонка 16, изменяя зазор между своим торцом и торцом канала 17. Изменяются расход через канал 17, давление в полости А; в этом случае распределитель 21 второй ступени усиления перемещается, изменяя давление в соответствующих полостях цилиндра. Шток 7 движется в сторону уменьшения величины внешнего возмущения до установленной величины.

На рис. 212 представлена гидросхема эрозионного станка, включающая следящий гидропривод с одноступенчатым несимметричным усилителем.

От насосной станции 9 через фильтр и электрогидравлический распределитель управления рабочая жидкость под давлением поступает в нижнюю полость гидроцилиндра 1 и одновременно через дроссель 8 — в канал управления. После дросселя 8 жидкость распределяется на два потока: первый направляется в верхнюю полость гидроцилиндра, а второй через канал 7 и заслонку 6 уходит на слив.

Расход в обоих потоках зависит от величины щели между торцом канала 7 и торцом заслонки 6. Игла-заслонка 6 загрессована в дно катушки управления 4, ее положение регулируется предварительно винтом и пружиной 3. Катушка 4 находится в постоянном магнитном

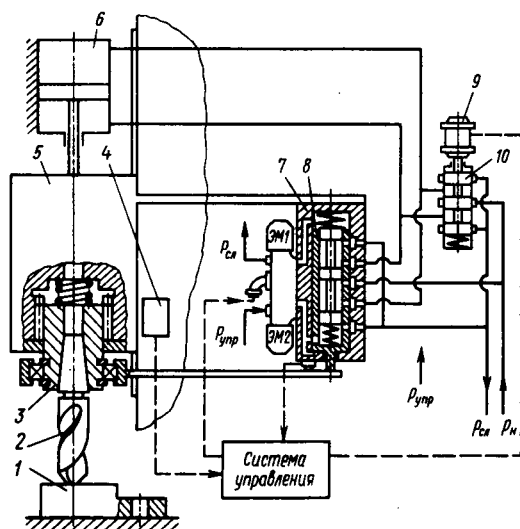


Рис. 213. Гидросхема сверлильного станка с программным управлением

поле, создаваемым магнитом 2 и двумя магнитопроводами; через канал 5 осуществляется дренаж направляющих иглы-заслонки 6.

При изменении межэлектродного зазора, изменяется величина напряжения, питающего катушку управления 4, равновесие между силой пружины и электродинамической силы магнитного взаимодействия между полем катушки 4 и полем постоянного магнита 2 нарушается. Катушка 4 устанавливается в новое положение равновесия, перемещается и жестко связанная с ней игла-заслонка 6, изменяя величину зазора, а следовательно, и расход жидкости через канал 7. Соответственно изменяется и давление жидкости в верхней полости гидроцилиндра. Шток перемещается в направлении, уменьшающем величину внешнего возмущения до установленного ее значения.

Как видно из рассмотренных гидросхем, одноступенчатые и двухступенчатые распределители управления позволяют облегчить задачу автоматизации управления рабочими органами различных станков. В этом отношении большой интерес представляет принципиальная схема гидросистемы, обеспечивающая быстрый подвод сверлильного шпинделя станка с программным управлением к обрабатываемой заго-

товке без программирования этого участка движения.

На рис. 213 представлена принципиальная гидросхема управления подачей пиноли сверлильного станка с ЧПУ. Гидросистема осуществляет следующий цикл работы. Быстрый подвод сверла 2, установленного в шпинделе 3, на скорости холостого хода до его соприкосновения с заготовкой 1. При этом масло под давлением проходит через распределитель 7 в верхнюю полость цилиндра 6. Масло из нижней полости сливается через распределитель 7 в бак до тех пор, пока не происходит контакт сверла 2 с заготовкой 1. Когда происходит контакт сверла 2 с заготовкой 1, втулка 8 закрывает доступ масла в гидроцилиндр 6, и пиноль 5 остановится, после чего начинается рабочая подача.

При рабочей подаче масло подается под давлением p_n через распределитель 10 в гидроцилиндр 6. Скорость рабочей подачи регулируется электромеханическим преобразователем (ЭМП) 9, управляемым от системы ЧПУ 4. Рабочая подача происходит до окончания сверления отверстия, после чего начинается быстрый отвод пиноли 5. При быстром отводе происходит отключение электромагнита ЭМ1 и включение ЭМ2. Жидкость с давлением $p_{упр}$ поступает под верхний торец распределителя 7, перемещая его вниз. Масло под давлением p_n поступает через распределитель 7 в нижнюю полость цилиндра 6. Масло из верхней полости сливается в бак, под давлением $p_{сл}$ происходит быстрый отвод. После отключения ЭМ2 золотник займет нейтральное положение и перемещение пиноли прекратится. Цикл на этом заканчивается.

Поскольку перемещение пиноли осуществляется с большими скоростями холостого хода, поэтому при большом весе пиноли и мгновенном торможении могут возникать в приводе большие динамические нагрузки. Для определения необходимого участка торможения, при заданном законе, составим уравнения движения привода:

$$m\ddot{S} + \varepsilon \dot{S}^2 + R + C(S_1 - S) = C_2(S_2 - S);$$

$$m_1\ddot{S} + K_1\dot{S}_1 + C_1 + (S_1 - S) = P_1(t);$$

$$m_2\ddot{S}_2 + K_2\dot{S}_2 + C_2(S_2 - S) = P_1(t) + (M + m_1)g,$$

где M — приведенная к трубопроводу масса рабочих частей станка; m_1, m_2 — соответственно приведенные к трубопроводу массы жидкости; S, S_1, S_2 — перемещения приведенных масс; ε — приведенный коэффициент сопротивления турбулентному движению жидкости; C_1, C_2 — приведенные коэффициенты жидкости и трубопроводов соответственно верхней и нижней полостей гидроцилиндра; K_1, K_2 — коэффициенты пропорциональности силы жидкого трения соответственно в верхней и нижней полостях цилиндра; $P(x)$ — возмущающая сила давления жидкости; R — силы сопротивления; g — ускорение свободного падения.

Решение этих уравнений позволяет находить путь торможения пиноли при заданных характеристиках привода: массы, скорости быстрого подвода, закона торможения и т. д.

Приравняв путь торможения величине начального открытия окон втулки, можно определить размеры окон втулки, их число и расположение, а также размеры самого золотника, т. е., решив эти уравнения, можно рассчитать элементы золотника, определить все основные параметры привода подачи пиноли сверлильного станка.

§ 4. Гидро- и пневмогидросистемы агрегатных станков

Целевые механизмы агрегатных станков и автоматических линий, состоящих из агрегатных станков, приводятся в движение гидравлическими механизмами, komponуемыми в гидросистемы, или пневмогидравлическими механизмами. Гидросистемы агрегатного станка представляют собой совокупность совместно действующих гидравлических агрегатов, которые предназначены для самостоятельного выполнения заданных функций. Гидро- или пневмосистема должны обеспечить длительную и безотказную работу агрегатного станка или автоматической линии при различных циклах работы. Гидросистема агрегатного станка включает три основных элемента: насос, гидроцилиндр и механизм распределения масла — гидропанель. Скорость рабочей подачи в агрегатных станках регулируют с помощью дросселей, либо с помощью изменения производительности насоса.

На рис. 214 представлена типовая гидравлическая схема агрегатного станка. Станок предназначен для сверления, нарезания резьбы в отверстиях, он снабжен поворотным столом. В гидравлической схеме использованы гидропанели: 5У4245 — для управления несамодельствующей головкой с гидроцилиндром 9 подачи; 5У2429 — для управления поворотным столом, т. е. цилиндром 13 зажима и фиксации и цилиндром 15 поворота; 5У3224 — для управления резьбонарезной головкой (цилиндр 16). Масло в гидросистему поступает от насоса 1 низкого давления и насоса 2 высокого давления; давление регулируется клапанами 4 и 25 и измеряется манометром 5. Температуру масла регулирует устройство 3. Поворотным столом управляет гидропанель поворота 14. Команды на фиксацию и зажим стола поступают на золотник 22 с электромагнитным управлением. Для поворота стола масло подается через распределитель 19 с электрогидравлическим управлением в цилиндр поворота 15. Скорость поворота стола регулируется дросселем поворота 20. При подходе к положениям фиксации поворот стола замедляется демпфером, встроен-

ным в цилиндр 15. Скорость перемещения поршня цилиндра фиксации и зажима устанавливается регулятором скорости 23, состоящим из дросселя и редукционного клапана двустороннего действия. Редукционный клапан 21 разгрузки планшайбы предназначен для регулирования давления при частичной разгрузке силы тяжести планшайбы. Резьбонарезная головка тормозится в конечных положениях путевыми дросселями 17, установленными на выходе и входе в гидроцилиндр 16. В цилиндр 16 масло поступает из гидропанели со встроенным дросселем 18 регулирования скорости.

Распределители 6 и 8 управляют потоком масла в гидроцилиндр и переключаются распределителями 7. Скорость масла здесь регулируется дросселями 12 со стабилизатором давления 24 и разделителем 11, перед которым установлен фильтр 26. Для получения плавности подачи предусмотрен клапан 10 противодавления.

В практике эксплуатации агрегатных станков широко применяются пневмогидравлические системы. В этих системах для создания силы перемещения поршня используют сжатый воздух, а

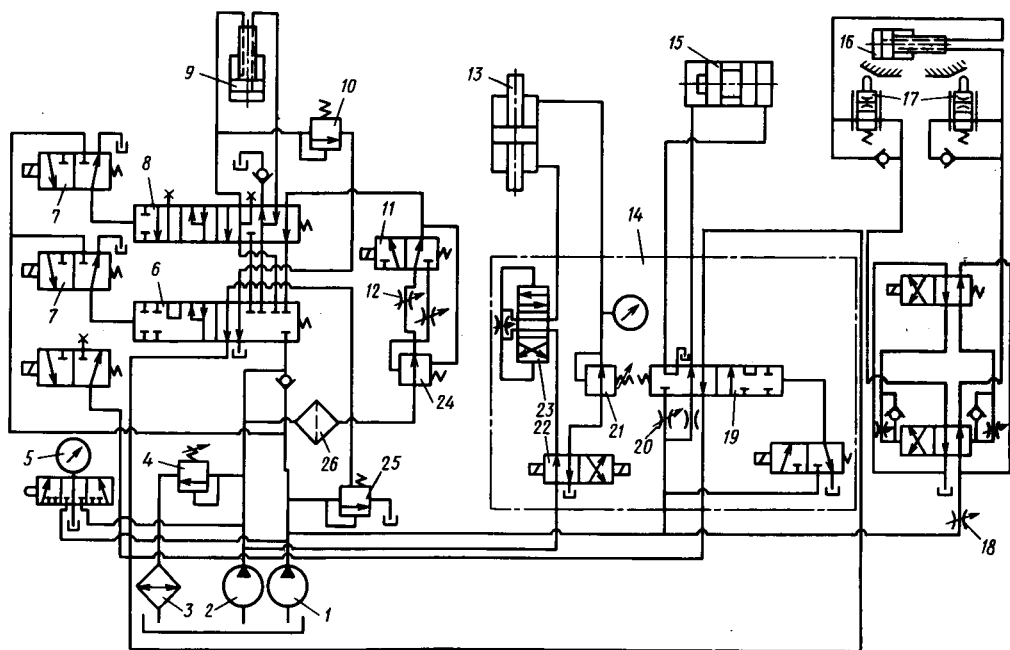


Рис. 214. Типовая гидравлическая схема агрегатного станка

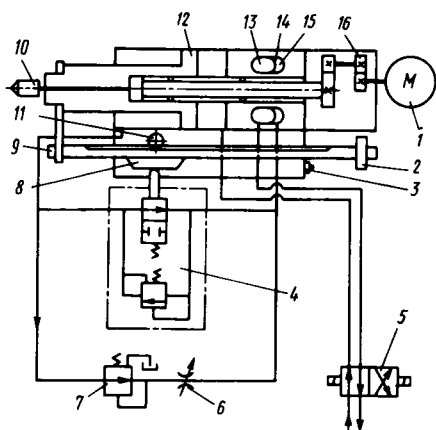


Рис. 215. Пневмогидравлическая система управления

скорость перемещения регулируют маслом, вытекаемым из обратной полости цилиндра. Большим преимуществом этих систем является отсутствие сложной и дорогой насосной установки. Агрегатные станки, в которых применены пневмогидравлические системы управления, компактны и проще по конструкции, но не могут развивать больших нагрузок. Такие станки применяют при обработке мелких деталей, они легко переналаживаются на работу по другому циклу. Для примера рассмотрим пневмогидравлическую систему управления ГС-2М силовой головки агрегатного станка (рис. 215).

Сжатый воздух от сети через регулятор давления и электромагнитный воздухораспределительный клапан 5 поступает в воздушную полость цилиндра и перемещает поршень 12 влево. При этом сначала происходит ускоренный подвод пиноли, так как стержень

клапана 4 ускоренного хода находится в приподнятом положении на профильной шпонке 8, закрепленной в скалке 9. Масло может через клапан 4 поступать из гидравлической полости цилиндра в камеру (полость) 15. Когда клапан 4 при движении поршня вперед сойдет со шпонки и закроется под действием пружины, масло будет протекать только через редукционный клапан 7 и дроссель 6. Вследствие этого поршню 12 и шпинделю 10 сообщается рабочая подача, которая регулируется открытием дросселя 6.

Обратный ускоренный ход пиноли начинается после того, как регулируемый упор 2, закрепленный на скалке 9, коснется корпуса головки и винт, ввернутый в упор 2, включит микропереключатель 3, который подает импульс на переключение клапана 5. В результате открывается доступ сжатого воздуха в полость 13, а воздушная полость цилиндра соединяется с атмосферой. Сжатый воздух в полости 13 давит на эластичную тонкостенную резиновую диафрагму 14, которая, деформируясь, вытесняет масло из полости 15. Под давлением масла открывается клапан 4, и через него оно поступает в полость силового цилиндра, обеспечивая быстрый отвод пиноли в исходное положение. Следующий цикл станка начинается включением конечного выключателя, который срабатывает от поворотного стола станка и дает импульс на переключение клапана 5. В результате в воздушную полость силового цилиндра подается сжатый воздух, и цикл работы повторяется.

Главное движение осуществляется от электродвигателя 1, через редуктор 16. Устройство 11 служит для ручного перемещения пиноли.

Глава 26 Ступени автоматизации производства

§ 1. Техничко-экономические и социальные аспекты автоматизации

Автоматизация производственных процессов включает комплекс мероприятий по разработке высокоинтенсивных управляемых технологических процессов и созданию на их основе новых высокопроизводительных средств производства, выполняющих основные и вспомогательные процессы без непосредственного участия человека.

Важнейшей функцией любых мероприятий по автоматизации является получение большего экономического эффекта по сравнению с неавтоматизированным производством данной продукции. Он достигается за счет обеспечения технического эффекта по трем основным направлениям: а) повышение качества изготавливаемой продукции — ее сортности, и т. д.; б) увеличение производительности — количества годной продукции в единицу времени; в) сокращение числа рабочих, непосредственно занятых в процессе производства — на основных и вспомогательных работах при обслуживании машин.

Если внедрение новой техники, как бы технически совершенной она не была, не обеспечивает существенного повышения качества и производительности, экономическая эффективность не может быть высокой, так как неизбежные, порой весьма значительные затраты на автоматизацию не могут окупиться. Процесс автоматизации не может быть сведен лишь к замещению функций, выполняемых человеком при обслуживании машин, устройствами контроля и управления, потому что

при этом возможно лишь некоторое сокращение фонда зарплаты без существенного изменения качества и производительности, так как технологические процессы, конструкции и компоновки машин остаются на прежнем уровне.

Автоматизация производственных процессов — это комплексная конструкторско-технологическая задача создания новой техники на принципиально новом уровне. Основным направлением автоматизации является не освобождение человека от обслуживания существующих машин, а создание таких технологических процессов и средств производства, которые были бы вообще невозможны, если бы человек по-прежнему оставался непосредственным участником технологического процесса.

Автоматизация производственных процессов является и могучим социальным фактором. Рост в нашей стране общеобразовательного и культурного уровня приводит к тому, что профессии, связанные с тяжелым и монотонным трудом, с вредными условиями производства становятся все менее привлекательными. Сюда относятся такие выполняемые вручную производственные функции, как загрузка заготовок, их межстаночная транспортировка, уборка производственных отходов, пассивный контроль и разбраковка деталей, сборка простейших соединений и др. Важнейшим путем разрешения этих трудностей является автоматизация и механизация производства.

В историческом развитии автоматизация машиностроительного производства прошла несколько ступеней, которые отличались задачами, масштабами, техническими решениями: 1) автомати-

зация рабочих машин, создание станков-полуавтоматов и автоматов;
2) автоматизация системы машин, создание автоматических линий;
3) комплексная автоматизация, создание автоматических участков и цехов.

§ 2. Автоматизация рабочих машин

Производственным процессам в машиностроении свойственна дискретность, определенное чередование во времени различных функций и их периодическая повторяемость. Рассмотрим процесс функционирования трех станков (C_I , C_{II} , C_{III} на рис. 216). На станке C_I до начала процесса обработки необходимо выполнить ряд функций (длительностью t_1), подготавливающих обработку: загрузку и закрепление заготовки, подвод инструмента, включение шпинделя и т. д. Далее следует обработка длительностью t_2 , которая завершается выключением станка; отвод инструмента, открепление и съем длительностью t_3 . Деталь на станок C_{II} поступает с некоторым смещением во времени, а на ее место устанавливают новую заготовку. При неизменных условиях интервал готовности детали и выдачи со станка C_I будет один и тот же ($T_I = \text{const}$).

Величина T — это длительность рабочего цикла машины дискретного действия, равная суммарной длительности технологических и вспомогательных процессов, в результате которых выдается одна или комплект готовых деталей. Разумеется, для машин, выполняющих различные операции по обработке даже одних и тех же деталей, длительности рабочего цикла различны ($T_I \neq T_{II} \neq T_{III}$).

В общем виде, при условии совместной работы человека и станка, длительность рабочего цикла

$$T = t_p + t_{x,x} + t_{всп}, \quad (169)$$

где t_p — время рабочих ходов цикла, продолжительность непосредственного технологического воздействия (обработки, контроля, сборки), для осуществления которого создана данная машина с соответствующими технологическими механизмами; $t_{x,x}$ — время несовмещенных холостых ходов цикла, выполняемых самой машиной благодаря наличию соответствующих механизмов холостых ходов (механизмы загрузки, зажима, поворота и др.); $t_{всп}$ — время несовмещенных вспомогательных операций, выполняемых человеком вручную или с помощью механизированных устройств тогда, когда в машине нет соответствующих автоматически действующих механизмов.

Если рассматривать систему машин (см. рис. 216), то могут возникнуть затраты времени на несовмещенную межстаночную транспортировку деталей, синхронизацию обработки и т. д. Реализация каждой ступени автоматизации требует иного комплекса технических средств как для непосредственного выполнения технологических и вспомогательных процессов, так и для их управления.

Необходимым, предварительным условием автоматизации является создание рабочих машин, технологический процесс в которых выполняется без участия человека — с помощью операционных механизмов, создающих относительные перемещения инструментов и заготовок. При этом все вспомогательные функции (загрузку, зажим, подвод и отвод механизмов

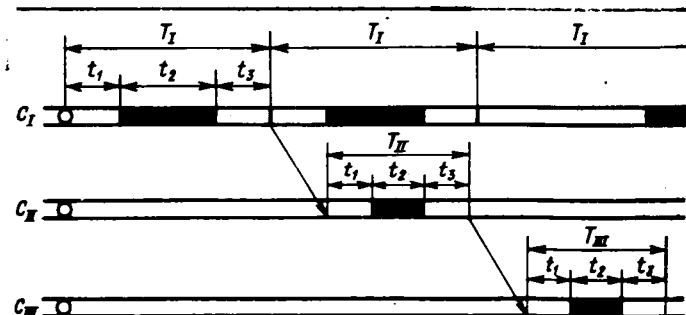


Рис. 216. Диаграмма процессов функционирования технологической системы из трех последовательно работающих станков

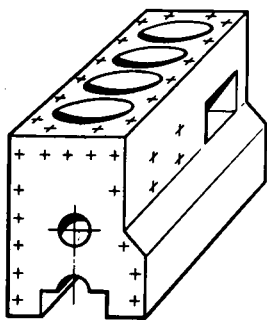


Рис. 217. Корпусная деталь

и т. д.) рабочий выполняет вручную или с помощью средств механизации.

Примерами машин такого типа является большинство универсальных металлообрабатывающих станков (токарные, сверлильные, шлифовальные и т. д.).

Рассмотрим обработку корпусной детали (типа блока цилиндров двигателя), где на верхней плоскости необходимо обработать несколько однотипных отверстий (рис. 217). Такая обработка в условиях неавтоматизированного производства может быть произведена на радиально-сверлильном станке (рис. 218). Здесь автоматически выполняются лишь функции вращения шпинделя и его подачи до заданной глубины сверления, после чего происходит отключение шпинделя. Все остальные функции в пределах рабочего цикла: подвод и отвод шпинделя с инструментом; подъем и поворот траверсы; радиальное перемещение шпиндельной бабки по траверсе; установка и закрепление детали, ее открепление и съем, замена инструмента; включения, переключения режимов и т. д. — выполняет рабочий. Станок не имеет ни автоматических механизмов для холостых ходов, ни системы управления, координирующей их работу и взаимосвязь с технологическими механизмами. Устройства управления обслуживают лишь дискретные элементы цикла, в пределах одного рабочего хода инструмента при обработке элементарной поверхности.

В некоторых станках устройства управления могут быть многократного действия (например, система переключающих упоров в плоскошлифовальных или фрезерных станках), и

достигать высокой степени технического совершенства (гидрокопировальные приспособления). Переход с одного элемента рабочего цикла на другой, включая отвод суппорта, установку инструмента на новую глубину обработки, тем более закрепление заготовок и их зажим — производится человеком. Таким образом, в универсальных станках механизмы холостых ходов, как правило, отсутствуют, вспомогательные функции выполняются человеком, т. е. $t_{х.х}=0$, $T=t_p+t_{всп}$. Особенностью универсальных станков является отсутствие совмещения операций. Это одноинструментальные станки, поэтому время рабочих ходов цикла равно суммарной длительности всех элементов обработки: t_{pi} ($t_p=\sum t_{pi}$). Ограниченные возможности человека почти исключают и совмещение вспомогательных функций по установке деталей, замене инструмента, его подводу и отводу и т. д., поэтому $t_{всп}=\sum t_{всп i}$. Поэтому длительность рабочего цикла весьма велика: $T=\sum t_{pi}+\sum t_{всп i}$.

Пример. На данном станке необходимо обработать 30 одинаковых отверстий, выполнив сверление ($t_{p1}=1,0$ мин), зенковку фасок ($t_{p2}=0,1$ мин) и нарезание резьбы ($t_{p3}=0,6$ мин). Тогда суммарная длительность обработки составит

$$t_p = \sum t_{pi} = 30(1,0 + 0,1 + 0,6) = 51 \text{ мин.}$$

Согласно данным исследований, при обработке на универсальных станках основное технологическое время составляет лишь 25—30% штучного

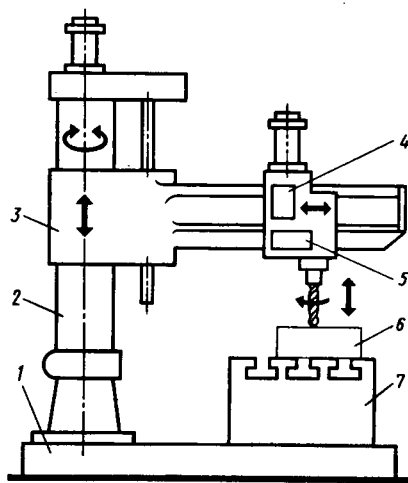


Рис. 218. Радиально-сверлильный станок:

1 — основание; 2 — колонна; 3 — траверса; 4 — шпиндельная бабка; 5 — панель управления; 6 — обрабатываемая деталь; 7 — стол

времени, остальное уходит на вспомогательные операции. Следовательно, длительность рабочего цикла как интервал выдачи одного изделия составит не менее $T = 150$ мин, т. е. около 2,5 ч.

Автоматом называют самоуправляющуюся рабочую машину, которая при осуществлении технологического процесса самостоятельно производит все рабочие и холостые хода цикла и нуждается лишь в наладке и контроле. Конструктивным признаком автомата является наличие полного комплекта механизмов рабочих и холостых ходов, осуществляющих все движения рабочего цикла, и системы управления, которая координирует и управляет их работой. Если в этом комплекте отсутствует один из механизмов и соответствующие функции выполняются вручную, мы имеем полуавтомат. Такими неавтоматизированными функциями чаще всего являются загрузка и съем деталей. Полуавтоматом называют машину, работающую с автоматическим циклом, для возобновления которого требуется вмешательство рабочего.

Первая ступень автоматизации означает не просто модернизацию обычных станков, их дооснащение средствами автоматики и т. д., а создание нового оборудования.

На рис. 219 показан многооперационный станок-полуавтомат с ЧПУ, на котором обрабатывают корпусные детали, в том числе приведенную на рис. 217. Таким образом, по технологическому назначению полуавтомат подобен свер-

ильному станку, показанному на рис. 218. Станки будут иметь одинаковую структуру рабочего цикла и порядок выполнения элементов обработки, одинаковый технологический комплект инструмента. Однако они отличаются как по компоновке, так и по конструкции.

Прежде всего в станке с ЧПУ автоматизированы все вспомогательные относительные перемещения: подвод и отвод инструментов, координатная перестановка инструмента и детали, последовательность выполнения всех элементов цикла, переключение технологических режимов, управление величиной перемещений и т. д. Рабочий лишь снимает готовую деталь, устанавливает и закрепляет новую заготовку и включает станок. Далее весь рабочий цикл выполняется автоматически по командам от пульта программного управления. Комплект инструментов находится в инструментальном магазине, их замена также автоматизирована, изменение координат обработки производится за счет перемещений стола по двум координатам в горизонтальной плоскости.

При обработке на таком станке не только уменьшается трудоемкость ручного обслуживания (рабочий выполняет лишь установку и съем деталей, а следовательно, может обслуживать несколько станков), но и повышается производительность, главным образом за счет ускоренного выполнения вспомогательных функций. В то же время длительность обработки, если не применены иные конструкции инструмента, существенно не меняется. При любом объеме инструментального магазина станок является одноинструментным, так как одновременно может работать только один инструмент, совмещение рабочих и холостых ходов во времени отсутствует, поэтому производительность по сравнению с обработкой на обычном универсальном станке увеличится не более чем на 40—60%.

Однако в пределах первой ступени автоматизации имеются и более существенные источники получения технического и экономического эффекта — это, прежде всего, использование принципа совмещения операций, применения многоинструментной и многопозиционной обработки, что может быть реализовано только в условиях автоматизирован-

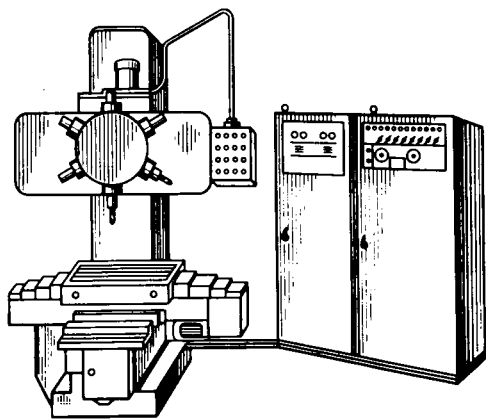


Рис. 219. Станок-полуавтомат с ЧПУ

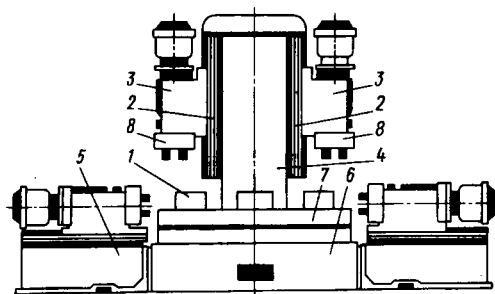


Рис. 220. Многопозиционный агрегатный станок-полуавтомат для обработки корпусных деталей: 1 — приспособление для закрепления обрабатываемых деталей; 2 — направляющая; 3 — силовая головка; 4 — центральная колонна; 5 — боковая станина; 6 — центральная станина; 7 — поворотный стол; 8 — шпиндельная коробка.

ного производства, так как человек не в состоянии производить одновременно несколько операций и координировать работу нескольких инструментов. На рис. 220 показан многопозиционный агрегатный станок-полуавтомат, который является еще одним вариантом оборудования, на котором возможна обработка корпусной детали, приведенной на рис. 217. Станок имеет три рабочие позиции, в которых каждая деталь проходит последовательно операции сверления, зенкования фасок, нарезания резьбы и одну холостую — для загрузки и съема деталей. На каждой позиции одновременно обрабатываются все отверстия с помощью многошпиндельных насадок с инструментами. Обработка производится во время стоянки поворотного стола, в это время на холостой позиции производится замена деталей. Таким образом, в данном многопозиционном станке-полуавтомате время рабочих ходов определяется не суммой всех переходов ($t_p = \sum t_{p_i}$), а длительностью лишь одного из них — сверлением отверстия ($t_p = t_{p_{\max}} = 1$ мин). Следовательно, для рассматриваемого примера оно сокращено по сравнению с одноинструментным станком приблизительно в 50 раз. За счет совмещения сокращены и холостые ходы цикла — все подводы и отводы производятся одновременно, инструмент не заменяется, загрузка и съем совмещены во времени с обработкой ($t_{всп} = 0$). Несовмещенные холостые хода цикла складываются из

времени быстрого подвода и отвода лимитирующей силовой головки (сверлильной) и поворота стола — $t_{x,x} = 12 \div 15$ с (0,25 мин). В итоге длительность рабочего цикла многопозиционного агрегатного станка-полуавтомата $T = t_p + t_{x,x} = 1,25$ мин.

Таким образом, сочетание автоматизации цикла и совмещения операций позволяет повысить производительность по сравнению с универсальными станками в десятки раз.

Агрегатный многопозиционный станок-полуавтомат по своим конструктивно-компоновочным формам совершенно не похож ни на универсальный радиально-сверлильный станок, ни на станок с ЧПУ, хотя обрабатываемые детали могут быть совершенно идентичными. Следовательно, автоматизация станков — переход с одной ступени автоматизации на более высокую есть всегда процесс коренного преобразования конструкций и компоновочных форм машин, а не просто оснащения их более развитыми средствами автоматики.

Поэтому первую ступень автоматизации можно характеризовать как автоматизацию технологических процессов. Высшей формой автоматизации на первой ступени являются поточные линии из полуавтоматов и автоматов, где без участия человека выполняются все или почти все внутрисканочные функции. В то же время межстаночная транспортировка, накопление полуфабрикатов, промежуточный контроль, уборка стружки и т. д. по-прежнему выполняются вручную или с помощью средств механизации, которые лишь облегчают и ускоряют ручной труд, но не исключают его.

§ 3. Автоматизация системы машин

Ко второй ступени автоматизации относятся автоматизация системы машин, создание автоматических линий, в которых без участия человека реализуются не только технологические процессы обработки, контроля и сборки, их обслуживающие функции (подача, зажим, ориентация и т. д.), но и целый комплекс вспомогательных процессов. К ним относятся межстаночная транспортировка, накопление межоперацион-

ных заделов, складирование, разделение и соединение потоков деталей при их транспортировке, уборка и переработка отходов, контроль функционирования звеньев производственного процесса, анализ работоспособности действующего оборудования и т. д. Таким образом, мы имеем дело с автоматизацией производственных процессов.

Автоматической линией называют систему машин-автоматов, расположенных, как правило, в технологической последовательности и объединенных общими средствами транспортировки, управления, удаления отходов и др.

На рис. 221 показана планировочная схема автоматической линии из агрегатных станков, на которой может производиться обработка корпусных деталей, в том числе показанной на рис. 217. Обработка производится в стационарных приспособлениях, где деталь фиксируют и зажимают.

Перемещение с позиции на позицию выполняет шаговый конвейер. Цикл

работы линии: 1) ход конвейера вперед, перемещение деталей на один шаг; 2) фиксация и зажим деталей в приспособлениях; 3) быстрый подвод всех силовых головок с многшпindelными насадками; 4) обработка, которая начинается одновременно на всех рабочих позициях; в это время происходит установка очередной заготовки на первую, загрузочную позицию, а также возврат шагового конвейера; 5) быстрый отвод силовых головок; 6) разжим и расфиксация деталей.

При конструировании линии используют принцип унификации. Силовые головки, шпиндельные насадки могут быть той же конструкции, что и в многопозиционных агрегатных станках (см. рис. 220). Однако принцип действия линии совершенно иной, чем у отдельных станков (см. рис. 218, 219).

Преимуществом автоматических линий является широкая возможность варьирования числом рабочих позиций, что используют для дальнейшего повышения производительности линий. Так, при обработке корпусной детали по рис. 217 возможно дифференцировать наиболее длительную операцию — сверление отверстий, таким образом, чтобы в одной из позиций она производилась на половину глубины, а в следующей — на оставшуюся глубину. Тогда для рассматриваемого выше примера длительность каждого из рабочих ходов составит $t_{рi}=0,5$ мин, а лимитирующей операцией цикла будет уже нарезание резьбы ($t_{рmax}=0,6$ мин). Тогда при длительности несовмещенных холостых ходов в $t_{хх}=0,3$ мин (быстрый отвод, разжим, ход конвейера, зажим, быстрый подвод) длительность рабочего цикла линии $T=t_{р}+t_{хх}=0,6+0,3=0,9$ мин. Следовательно, производительность линии будет еще выше.

Третья ступень автоматизации состоит в комплексной автоматизации производственных процессов, создании автоматизированных технологических комплексов в масштабах участков и цехов. Особенностью комплексной автоматизации является не только увеличение общих масштабов охвата производственных задач, но и качественное изменение методов их решения. На всех предыдущих ступенях автоматизации устройства и системы управления реша-

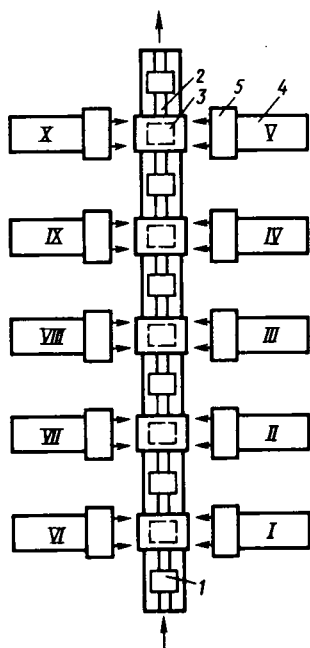


Рис. 221. Автоматическая линия из агрегатных станков:

1 — силовые головки; 2 — фиксаторы; 3 — шаговый конвейер; 4 — приспособления для зажима и фиксации обрабатываемых деталей; 5 — силовая головка со шпиндельной насадкой; 6 — номера силовых головок

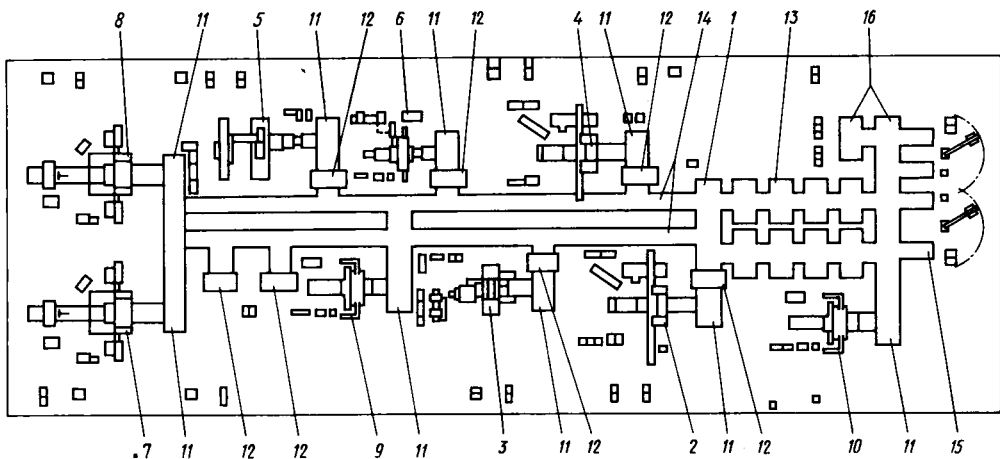


Рис. 222. Планирование автоматизированного технологического комплекса «Prisma-2» (ГДР);

1, 2, 10 — позиции измерения; 3, 4, 6, 9, 11, 12 — позиции обработки корпусных деталей; 11 — поперечные конвейеры; 12 — вспомогательные позиции; 13 — накопитель; 14 — продольный конвейер; 15 — участок закрепления деталей; 16 — накопитель поддонов

ют, как правило, лишь технологические задачи и задачи, сопряженные с ними: управление последовательностью срабатывания, скоростями перемещения, взаимная координация и блокировка работы механизмов и машин и т. д. Эти задачи решают, как правило, на основе использования средств локальной автоматики, работающих по жестко заданной программе или с элементами саморегулирования.

Комплексная автоматизация характерна широким внедрением автоматизации организационно-экономических функций, без чего невозможно эффективное управление производством на уровне технологических участков, цехов, заводов.

На рис. 222 приведена планировочная схема автоматизированного технологического комплекса «Prisma-2» (ГДР), созданного для обработки корпусных деталей в условиях серийного производства. Базовым технологическим оборудованием, встроенным в систему, являются многооперационные станки-автоматы с ЧПУ. ЭВМ является «мозговым» центром системы, выполняя как непосредственные функции управления технологическим и вспомогательным оборудованием, так и функции технико-экономического анализа и оп-

тимального управления. Комплекс включает независимо работающие станки-автоматы с ЧПУ, систему транспортирования и накопления обрабатываемых деталей и систему управления. На рабочей позиции производится автоматическое измерение припусков на обработку по трем координатам с высокой точностью. Обработка производится на фрезерных станках с горизонтальным и вертикальным шпинделем (поз. 2—4), сверлильных (поз. 5 и 6) и шлифовальных станках (поз. 7 и 8). На измерительных машинах (поз. 9 и 10) измеряется точность обработанных деталей. Транспортная система включает продольные конвейеры, по которым детали перемещаются на специальных поддонах с приспособлениями для закрепления. В направляющие конвейера подается сжатый воздух.

Система управления выполняет следующие функции: учет обрабатываемых деталей с оптимизацией загрузки рабочих позиций, управление работой станков и транспортирующих устройств, оптимизация технологических процессов, в том числе числа рабочих, технологических режимов, автоматический контроль инструмента, расчет экономических показателей и т. д.

механизмов необходимы специальные устройства, механизмы, системы управления, которые должны обеспечивать не только взаимную координацию, но и заданные режимы работы, величину и место всех дискретных перемещений. Наконец, в каждом автомате имеются блокирующие механизмы и устройства, например для выключения автомата после окончания расхода прутка. Для привода всех перемещений, реализации всех силовых нагрузок и т. д. любой автомат, как и всякая рабочая машина, имеет двигательный и передаточный механизмы, которые образуют достаточно сложную кинематическую схему (рис. 225).

В автоматах с механическим приводом перемещений имеются обычно две кинематические цепи: 1) главного движения — вращение рабочих шпинделей; 2) управления — вращение распределительного вала.

Привод вращения рабочих шпинделей происходит от электродвигателя $N=13$ кВт; вращение передается через

ременную передачу, зубчатую передачу 48—57 и гитару сменных зубчатых колес a, b, c, d на центральный вал, на конце которого неподвижно закреплено зубчатое колесо $z=48$, передающее вращение через зубчатые колеса $z=36$ рабочим шпинделям.

Привод вращения распределительного вала осуществляется по трем кинематическим цепям: привода рабочего вращения — во время обработки; привода быстрого вращения — во время холостых ходов и привода наладочных перемещений — во время настройки автомата. Рабочее вращение распределительного вала осуществляется по следующей кинематической цепи: центральный вал; зубчатая передача 32—63, сменные зубчатые колеса e, f, q, h , зубчатая передача 42—63, от которой через включенную электромагнитную муфту рабочего вращения движение передается конической зубчатой передаче 22—22. Далее вращение через зубчатые колеса 28—67 и червячную передачу 1—42 передается распределительному валу. Быстрое вращение

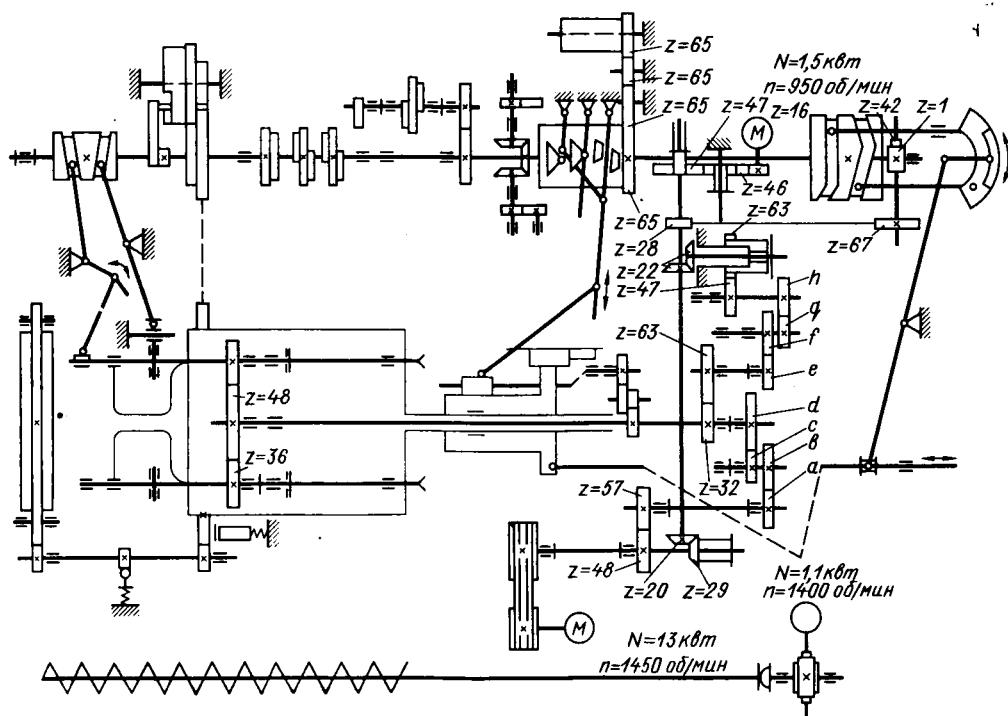


Рис. 225. Кинематическая схема токарного многошпиндельного автомата

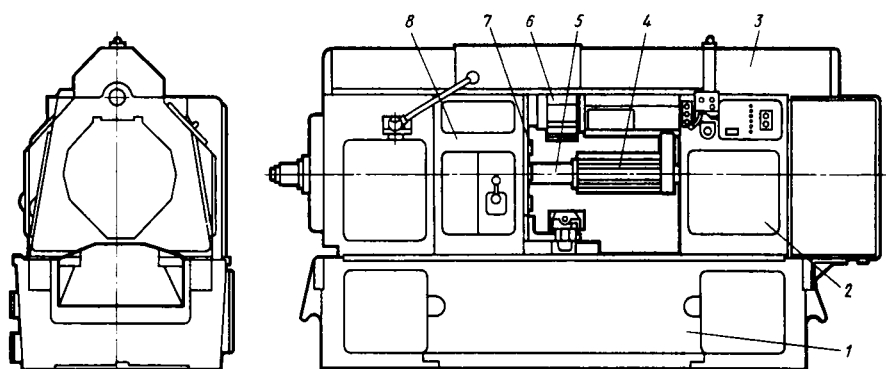


Рис. 223. Токарный многошпиндельный автомат:

1 — станина; 2 — коробка привода; 3 — траверса; 4 — продольный суппорт; 5 — отрезной суппорт; 6 — механизм неподвижения суппортов; 7 — шпиндельный блок; 8 — коробка шпиндельного блока

следует ход механизма подачи, пруток подается до упора. После этого происходит зажим прутка и, наконец, отвод упора и возврат механизма подачи. Как только будет завершена работа последнего из позиционных механизмов (на рис. 224 это продольный суппорт), следует расфиксация шпиндельного блока. Таким образом, дли-

тельность цикла T , за который выдается одна готовая деталь (с последней рабочей позиции), складывается из поворота (чистое время холостых ходов) и стоянки (время обработки лимитирующим инструментом, его подвода и отвода). Вспомогательное время при работе на автомате отсутствует. Для управления работой всех перечисленных

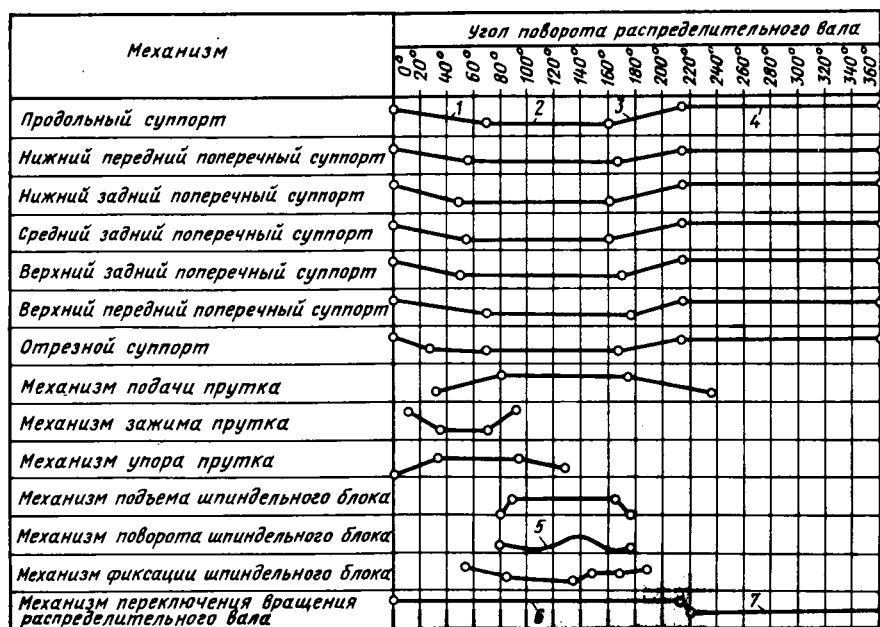


Рис. 224. Циклограмма токарного многошпиндельного автомата:

1 — отвод; 2 — механизм неподвижен; 3 — подвод; 4 — стоянка; 5 — поворот; 6 — фиксация; 7 — переключение вращения

томатической заменой инструмента являются основным средством автоматизации технологических процессов серийного производства.

Дальнейшее преобразование машиностроительного производства связано с широким и многоцелевым внедрением электронных вычислительных машин (ЭВМ), которые ранее использовались лишь для анализа и преобразования информации. Традиционные элементы и системы автоматизации дискретного производства (распределительные с кулачками, копируемые и релейно-

контакторные системы и др.) являлись и являются неотъемлемыми конструктивными элементами станков.

Развитие и совершенствование систем с ЧПУ и прямого управления от ЭВМ непрерывно сопровождается расширением сферы их применения. В классических автоматах и полуавтоматах, например, токарно-револьверных, фасонно-продольного точения, токарных многошпиндельных последовательного действия и др., традиционные системы управления с распределительным валом все больше уступают место системам ЧПУ.

5.

Глава 27 Основные типы автоматов

§ 1. Структура автоматов

Под структурой любых рабочих машин, в том числе полуавтоматов и автоматов, подразумевают обычно состав элементов и подсистем, из которых состоят данные системы, с определенным характером их взаимодействия. Для наглядного графического изображения структуры отдельных сложных устройств, машин и их систем применяют так называемые структурные схемы, которые характеризуют лишь принципиальную сторону устройства и функционирования, вне конструктивной реализации.

Общий вид токарного многошпиндельного автомата приведен на рис. 223. Циклограмма его работы показана на рис. 224. Обработываемые детали (тела вращения) изготавливают из прутков. Станок имеет один центральный продольный суппорт и несколько поперечных — по числу рабочих позиций. На суппортах станка может быть расположено 20 и более осевых и поперечных инструментов. Все шпиндели с прутками смонтированы в едином шпиндельном блоке, совершающем периодический поворот. Заготовка (отрезок прутка, поданный до упора в загрузочной позиции) при каждом очередном повороте шпиндельного блока подается последовательно в рабочие зоны действия

различных инструментов (проходных и расточных, фасонных и фасочных, подрезных и прорезных резцов и др.). Переходя последовательно из позиции в позицию, заготовка получает постепенно полный объем технологического воздействия. На последней позиции производится отрезка обработанной детали, после чего при очередном повороте шпиндель снова попадает в загрузочную позицию, и пруток подается на заданную длину. Циклограмма работы автомата (рис. 224) показывает достаточно сложный характер взаимодействия основных механизмов, действие которых является дискретным. Рабочий цикл начинается с отвода всех суппортов, далее следует поворот шпиндельного блока специальным механизмом периодического поворота, после чего происходит фиксация блока, когда он жестко связывается с базовыми элементами (станиной, стойкой и т. д.). Окончание фиксации означает одновременный ввод в действие всех позиционных механизмов. Все суппорты и приспособления имеют одинаковые циклы срабатывания (быстрый подвод, медленную рабочую подачу, быстрый отвод, которые для различных механизмов и позиций завершаются в разное время). Одновременно в загрузочной позиции происходит подача очередной порции прутка. Сначала — разжим зажимного механизма и подвод упора подачи, который устанавливается напротив шпинделя. Затем

§ 4. Методы и средства автоматизации в массовом и серийном производствах. Применение ЭВМ

Выше были рассмотрены варианты технологического оборудования с различным уровнем автоматизации, в равной степени пригодные для обработки корпусной детали по рис. 217:

1) универсальные станки с ручным управлением; 2) станки-полуавтоматы с ЧПУ; 3) агрегатные станки-полуавтоматы; 4) автоматические линии из агрегатных станков; 5) автоматизированные технологические комплексы с управлением от ЭВМ.

Важнейшими критериями сравнительной оценки при выборе того или иного варианта являются: 1) производительность Q — количество годной продукции, выдаваемой машиной в единицу времени, шт/мин; 2) надежность в работе, которую можно оценить, например, коэффициентом технического использования $\eta_{\text{тех}}$; 3) капитальные затраты K , руб.; 4) число обслуживающих рабочих, характеристика — норма обслуживания станочников, наладчиков, операторов, станков/чел.; 5) универсальность, характеристика диапазона возможных переналадок оборудования на производство различных деталей (универсальные станки имеют весьма широкий диапазон переналадок; специализированные могут переналаживаться на обработку однотипных деталей, специальные станки проектируют только для одной детали); 6) мобильность — характеристика быстроты переналадки станков на обработку других деталей — количественно оценивается средней длительностью переналадки $\theta_{\text{пер}}$, мин.

Каждый тип станочного оборудования и его системы характеризуются, как правило, неповторяющимся сочетанием этих характеристик, большинство которых носит «конфликтный» характер, что и определяет применимость того или иного оборудования для автоматизации различных видов производства.

Раньше всего и наиболее успешно решались задачи автоматизации массового поточного производства в отрас-

лях, где большие масштабы производства сочетались с относительной стабильностью изготавливаемых объектов. Именно здесь получили распространение специализированные и специальные автоматы и полуавтоматы, а также автоматические линии различных типов.

Для производства деталей типа колец и втулок широко используют автоматические линии из специального и типового оборудования (токарного, шлифовального и т. д.). Для массового производства неподвижных при обработке деталей применяют линии из агрегатных станков; для производства деталей с меньшей программой применяют поточные линии из агрегатных станков-полуавтоматов. Для изготовления мелких деталей типа колпачков используют роторные автоматические линии. Все эти системы обладают высоким потенциалом производительности благодаря совмещению операций, для их обслуживания необходимо небольшое число рабочих. Однако все их преимущества распространяются только на условия массового (иногда — крупносерийного) производства, так как их, как правило, не переналаживают или переналаживают длительное время.

Длительное время существовала довольно резкая граница в применении средств производства: специальные автоматы и полуавтоматы, автоматические линии — в массовом производстве, универсальные станки с ручным управлением — в серийном и индивидуальном.

Важным этапом автоматизации машиностроительного производства явилось появление и широкое применение систем числового программного управления (ЧПУ), которые первоначально использовали только в технологическом оборудовании (станки с ЧПУ токарной, фрезерной, расточной групп). Использование универсальных станков-полуавтоматов и автоматов с ЧПУ позволило сочетать мобильность обычных универсальных станков с высокой степенью автоматизации цикла и быстродействием при выполнении холостых ходов, что было свойственно ранее лишь труднопереналаживаемым автоматам. В настоящее время станки-полуавтоматы с ЧПУ как обычного типа, так и с ав-

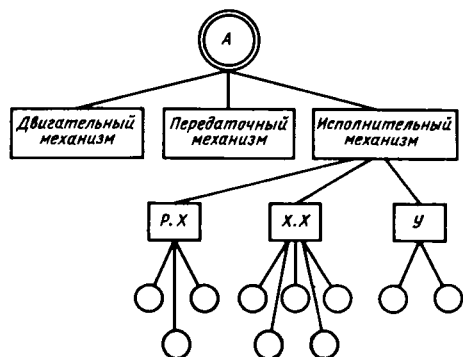


Рис. 226. Структурная схема механизма автомата

распределительного вала осуществляется при включенной электромагнитной муфте, соединенной с конической зубчатой передачей 29—20; зубчатые колеса 28—67 и червячную передачу 1—42. Если включена муфта рабочего вращения, то муфта быстрого вращения должна быть выключена, и наоборот.

Включение и выключение этих электромагнитных муфт осуществляет кулачками командоаппарата. Барабан командоаппарата связан с распределительным валом зубчатой передачей 65—65—65.

Привод наладочных перемещений осуществляется от электродвигателя $N=1,5$ кВт через зубчатую передачу 16—46—47, электромагнитную муфту, зубчатые колеса 28—67, червячную передачу 1—42. При включении привода наладочных перемещений электромагнитные муфты рабочего и быстрого вращения распределительного вала отключаются.

Распределительный вал можно поворачивать также вручную ключом, который надевается на квадратный конец червяка $K=1$. В момент переключения вращения распределительного вала с быстрого на рабочее на электромагнитную муфту рабочего вращения кратковременно подается удвоенное напряжение, благодаря чему распределительный вал резко затормаживается до скорости рабочего вращения. При включении рабочей подачи или привода наладочного вращения распределительный вал затормаживается до полной остановки тормозной муфтой, соединенной с зубчатым колесом $z=46$.

Последовательность элементов рабочего цикла, показанная на циклограмме, определяется принципом работы автомата А и схемой обработки. Для реализации рабочего числа (рис. 226) требуется всегда наличие трех групп механизмов: 1) механизмов рабочих ходов (РХ), которые непосредственно выполняют то технологическое воздействие, которое является функциональным назначением автомата; 2) механизмов холостых ходов (ХХ), которые обеспечивают необходимые условия для рабочих процессов (зажим и подачу изделий и т. д.); 3) механизмов управления (У), которые управляют механизмами рабочих и холостых ходов (целевыми механизмами автоматов). Все три группы механизмов, наличие которых является обязательным для автомата, образуют исполнительный механизм автомата, кроме того, как и у любой рабочей машины, у него имеются двигательный и передаточный механизмы. Это изображается структурной схемой механизмов автомата (рис. 226). Конкретный перечень механизмов индивидуален для каждого типа автомата или полуавтомата.

Так, для многооперационного станка-полуавтомата с ЧПУ (см. рис. 219) механизмами рабочих ходов являются координатный стол и механизм подачи шпинделя; механизмами холостых ходов — инструментальный магазин, автооператор для замены инструмента, механизм зажима инструмента в шпинделе; механизмами управления — пульт программного управления, устройства обратной связи и др. В агрегатном станке-полуавтомате (см. рис. 220) механизмы рабочих ходов — это силовые головки и силовые столы, шпиндельные коробки; механизмы холостых ходов — зажимные приспособления, механизмы поворота и фиксации стола; система управления циклом находится в электрошкафу и реализована в виде системы релейно-контактных элементов.

§ 2. Типовые целевые механизмы, устройства и системы управления

Структурные особенности полуавтоматов и автоматов: 1) применение однотипных механизмов в машинах различного технологического назначе-

ния, например в многошпиндельном токарном автомате (см. рис. 223) и многопозиционном агрегатном станке (см. рис. 220), имеются механизмы поворота и фиксации, которые функционально и конструктивно могут быть идентичны; 2) применение принципиально различных конкурирующих решений одной и той же задачи. Например, программа работы механизмов и устройств, реализующих одну и ту же циклограмму (см. рис. 224), может быть задана следующими видами программносителей; а) системой упоров и конечных выключателей; б) системой взаимно координированных кулачков на едином валу, который называют обычно распределительным валом; в) перфолентой с определенным образом пробитыми отверстиями; г) магнитной лентой с соответствующими магнитными дорожками; д) записью информации в «памяти» электронной вычислительной машины и др. Аналогичным образом может быть задана программа работы агрегатных станков (см. рис. 220) и линий на их основе (см. рис. 221), станков с ЧПУ (см. рис. 219) и др. Таким образом, важнейшей особенностью современных автоматов дискретного производства является наличие типовых целевых механизмов холостых ходов, устройств и систем управления, область применения которых выходит далеко за пределы типажа металлорежущих станков.

Наиболее распространенными типовыми целевыми механизмами являются механизмы питания, зажима, поворота и фиксации, замены инструмента и др.

Механизмы питания обеспечивают подачу обрабатываемого материала в рабочую зону и отвод детали после обработки. Механизмами питания для материала типа прутка (трубы, проволока и т. д.) могут быть механизмы питания из бунта, представляющего собой моток проволоки, которая автоматически разматывается, правится и подается на обработку; механизмы пруткового питания, где подача производится специальными устройствами типа подающих цанг, силой тяжести, гидравлическими и пневматическими устройствами и т. д. Механизмы питания для дискретно подаваемого материала (штучных заготовок) делят на следующие группы: механизмы мага-

зинного питания, где операции ориентации деталей и вкладывания их в магазин-накопитель производятся вручную, а подачи в рабочую зону и отвода после обработки — автоматически, специальными механизмами-автооператорами; механизмы бункерного питания, где заготовки хаотично засыпают в специальную емкость (бункер), а их поштучная выборка, ориентация, подача в рабочую зону и отвод после обработки производятся автоматически, с помощью автооператоров и других устройств; 3) механизмы ручного питания, механизированные устройства, которые облегчают труд человека при обслуживании универсальных станков и полуавтоматов, сокращают вспомогательное время.

Автооператоры являются, как правило, специализированными встраиваемыми конструкциями, которые конструктивно выполняются как единое целое с автоматом и работают с ними в едином ритме. Они имеют ограниченное число степеней свободы (не более двух-трех), как правило, переналаживаться не могут и применяются в автоматах массового производства. В последнее время широко применяют невстраиваемые механизмы питания (манипуляторы и промышленные роботы), конструктивно независимые от обслуживаемых машин и обладающие развитыми системами управления. Манипуляторы, как и автооператоры, работают по жестко заданной программе, но обладают большим числом степеней свободы и при этом полностью автономны. Манипуляторы образуют вместе с обслуживаемыми машинами единые системы — модули, которые могут эксплуатироваться как индивидуально, так и служить основой комплектования автоматических систем машин, в том числе управляемых от ЭВМ. Общий вид модуля, состоящего из токарного станка-полуавтомата 1 с автоматической заменой инструмента и двухзахватного манипулятора 3, который перемещается по portalу 2, показан на рис. 227. Детали снимают с продольного конвейера 4, обрабатывают и возвращают туда же. Манипуляторы, как правило, являются специализированными, но их применяют в условиях не только массового, но и серийного производства. Промышлен-

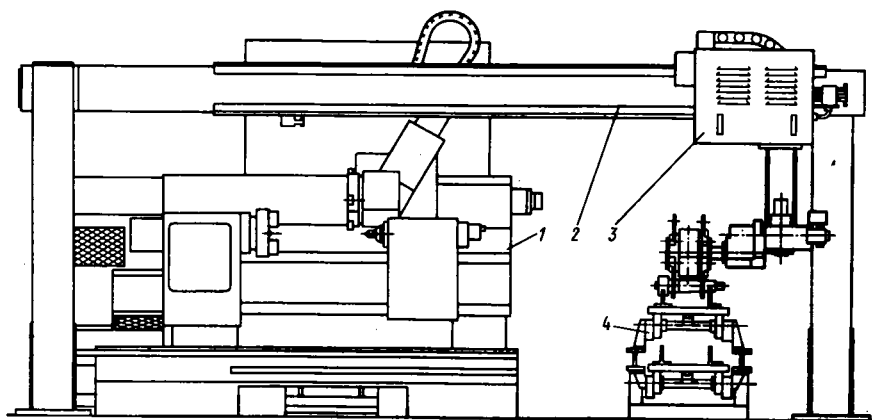


Рис. 227. Модуль автоматизированного технологического комплекта, управляемого от ЭВМ

ные роботы являются универсальными средствами автоматизации, их используют для осуществления как вспомогательных процессов (автоматической загрузки и съема деталей, изменены их ориентации и др.), так и основных технологических (сборки, сварки, окраски и др.). Их появление и совершенствование явилось логическим сочетанием общих принципов автоматизации дискретного производства и развития электронных систем управления, которые ранее применялись только для отдельных технологических операций (станки с ЧПУ). Современные промышленные роботы имеют до 5—6 степеней свободы, обладают возможностями адаптации и оптимизации процессов функционирования, что достигается применением развитых систем управления. На рис. 228 показан общий вид и схема работы промышленного робота типа ASEA (Швеция), который в пределах зоны обслуживания (тонкая линия на рис. 228) может производить захват и перемещение деталей в пространстве.

Механизмы зажима обрабатываемых деталей обязательны для всех автоматов дискретного действия. Общность выполняемых функций (обеспечение стабильного положения деталей при обработке независимо от технологических нагрузок) определяет типовые конструктивные решения. Так, для зажима круглого материала в токарных автоматах (см. рис. 223, 227) применя-

ют разнообразные патроны и оправки с зажимными элементами цангового, кулачкового, мембранного и других типов. Для зажима деталей произвольной формы, неподвижных при обработке, используют различные приспособления с зажимными прихватами. Стационарные зажимные приспособления в станках для обработки корпусных дета-

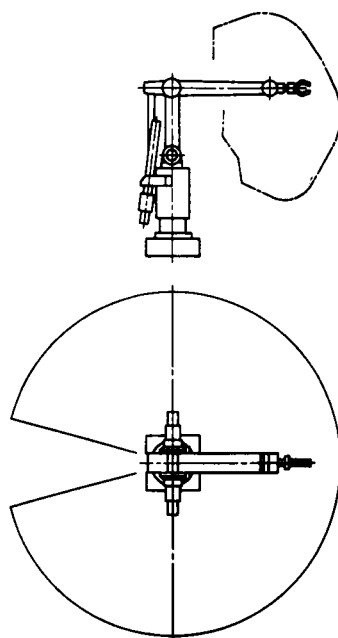


Рис. 228. Промышленный робот типа ASEA (Швеция)

лей (см. рис. 219, 220, 221) связаны со станиной, столом или кронштейном станка. Приспособления-спутники используют для установки деталей, которые невозможно или нецелесообразно перемещать из позиции в позицию автономно.

Механизмы поворота и фиксации являются типовыми механизмами для всех многопозиционных и многих однопозиционных автоматов, где требуется координированный поворот деталей. Эти механизмы, широко применяемые в машинах самого различного технологического назначения, по очереди «обслуживают» различные поворотные устройства (шпиндельные блоки, поворотные столы, кантователи, револьверные головки и т. д.), обеспечивая их периодический поворот и высокую точность стационарного положения (во время стоянки). Тип механизма поворота зависит не от назначения автомата, а в первую очередь от числа позиций. Так, при числе позиций 8—10 применяют, как правило, мальтийские механизмы (плоские и сферические), а при большем числе позиций — кулачково-цевочные (см. гл. 35).

Механизмы замены инструмента широко применяют в многооперационных станках-полуавтоматах и автоматах с ЧПУ (см. рис. 234 и др.). Они представляют собой двурукие захваты с осевым (извлечение инструмента из шпинделя) и поворотным движением, а иногда — и с дополнительными перемещениями (в зависимости от типа и положения инструментального магазина).

Наличие типовых целевых механизмов автоматов раскрывает широчайшие возможности для применения принципов унификации при проектировании автоматов, использования опыта автоматостроения одних отраслей в смежных отраслях, разработке единых методов расчета и конструирования.

Такую же высокую степень общности имеют и механизмы, устройства, а также и в целом системы управления автоматов, прежде всего — системы управления их рабочим циклом, процессами функционирования. Всякая развитая система автоматического управления машинами дискретного действия (циклическими) имеет следующие функциональные элементы: про-

граммоноситель, на котором условным кодом записывается программа работы машины (последовательность срабатывания механизмов и устройств, режимы работы, величина и место перемещений и др.); считывающее устройство, которое получает первичные сигналы (команды управления) от программноносителей в виде электрических импульсов, механических перемещений и др.); механизм ввода программы, который обеспечивает поэтапный, последовательный процесс считывания всей программы, закодированной на программноносителе; передаточно-преобразующее устройство, которое преобразует полученные команды управления по форме, величине, направленности и т. д., т. е. в тот вид, в котором они могут восприниматься и реализоваться исполнительными механизмами; исполнительные механизмы, которые являются частными объектами управления в общей системе машины-автомата и работают по программе, задаваемой программноносителем, реализуя требуемую циклограмму ее работы (см. рис. 224); устройства обратной связи, которые контролируют правильность выполнения (отработки) заданной программы и в случае необходимости корректируют последующие команды управления. Последние устройства могут отсутствовать, если имеется уверенность в надежном выполнении заданной программы с погрешностями, не превышающими допустимые, в этих случаях системы управления называются разомкнутыми, при наличии обратной связи — замкнутыми.

Наиболее удобной является типизация систем управления автоматов по виду программноносителей, которые по существу определяют все остальные функциональные устройства: считывающие, передаточно-преобразующие и т. д. По типу программноносителей все системы управления можно разделить на следующие: 1) системы управления упорами (цикловое управления), где программа задается расстановкой ограничивающих упоров, путевых и конечных переключателей и др., а также созданием соответствующих электрических и гидравлических связей между ними; эти системы широко применяют в автоматическом оборудовании с гидравлическим и пневматическим приводом подачи; в агрегатных станках

(см. рис. 220) и автоматических линиях из агрегатных станков (см. рис. 221), в манипуляторах (см. рис. 228), в станках с цикловым программным управлением (см. рис. 219);

2) системы управления копирами, где программа задается профилем плоского или объемного копира, который в том или ином масштабе соответствует реальной конфигурации обрабатываемой детали; их широко используют в токарных гидрокопировальных полуавтоматах (см. рис. 227), фрезерных электрокопировальных полуавтоматах, фотокопировальных станках и др.;

3) системы управления с распределительным валом и кулачками, где программа работы каждого механизма задается профилированием соответствующего кулачка, а координация работы — фиксированным взаимным расположением кулачков на общем распределительном валу; по этой системе до недавнего прошлого строилась большая часть токарных автоматов для массового и крупносерийного производства (см. рис. 223 и 225), а также малые агрегатные станки, сборочные и контрольные автоматы и др.;

4) системы числового программного управления, где программа работы задается с помощью перфокарт и перфолент, магнитных лент, а также установкой штекеров на панелях и ко-

мандоаппаратах и др., считывание и преобразование производятся на электрической и электронной основе (см. рис. 234, 240, 227 и др.); эти системы являются основными при создании быстропереналаживаемого автоматического оборудования для условий серийного производства;

5) системы прямого числового управления, где программа работ кодируется непосредственно в памяти специализированных управляющих вычислительных машин или универсальных ЭВМ, которые реализуют функции не только переработки и анализа информации, но и непосредственного управления технологическим оборудованием (см. рис. 222).

На рис. 229 показана конструктивная схема привода суппорта токарного многошпиндельного автомата (см. рис. 223). Программносителем здесь является кулачок, установленный на распределительном валу, который обеспечивает все необходимые скорости и величины перемещений, моменты их начала и завершения (быстрый подвод — рабочая подача — быстрый отвод — выстой в конечном положении). Считывающим устройством является ролик, который постоянно контактирует с поверхностью кулачка и получает перемещения в зависимости от профиля кулачка, механизмом ввода программы — привод вращения распределительного вала. Передаточно-преобразующее устройство представляет собой систему рычагов, которая передает движения, задаваемые ролику, и при этом преобразует их как по величине, так и по направлению в пространстве. Наконец, исполнительным органом является сам целевой механизм — суппорт автомата; устройства обратной связи отсутствуют. Однако такая система требует весьма длительного времени переналадок, включая смену и регулировку кулачков, изменения передаточного отношения рычажных систем, регулировки жестких упоров и др.

На рис. 230 показана структурная схема числового программного управления. Программносителем является перфолента, где заданная программа работы автомата кодируется пробивкой отверстий. Ввод программы осуществляется лентопротяжным механизмом, который равномерно или дискретно

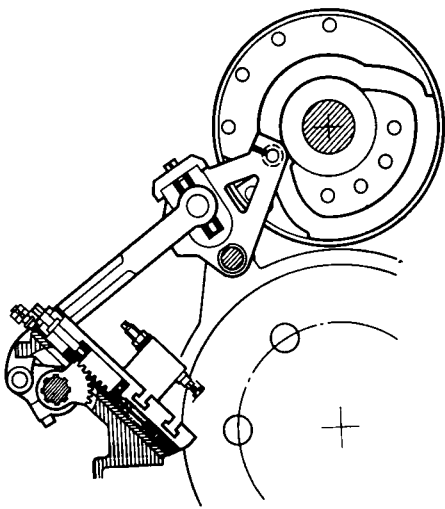


Рис. 229. Привод поперечного суппорта токарного многошпиндельного автомата

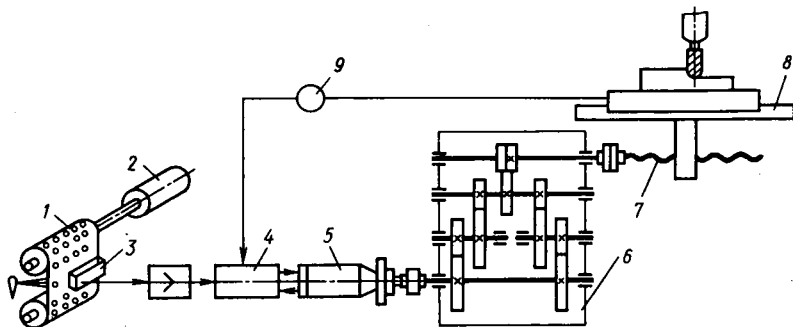


Рис. 229. Схема числового программного управления:

1 — лента; 2 — устройство для считывания; 3 — считывающее устройство; 4 — передаточно-преобразующее устройство; 5 — реле; 6 — реле; 7 — винт; 8 — стол станка; 9 — датчик обратной связи.

перемещает ленту мимо считывающего устройства контактного или бесконтактного типа. В первом случае опускание на поверхность ленты блока контактных головок приводит к появлению системы командных импульсов (там, где есть отверстия). Бесконтактные устройства используют фотоэлектрический эффект (луч воспринимается элементами лишь там, где есть отверстия), пневматический струйный эффект и т. д. Передаточно-преобразующие устройства представляют собой сложные электрические и электронные схемы, которые производят усиление командных импульсов, их синхронизацию и формирование и т. д., преобразуя их в конечном итоге в команды непосредственного управления следящим приводом движения исполнительного механизма — в данном случае стола станка. В качестве источников движения — объектов управления — применяют регулируемые двигатели постоянного тока, шаговые двигатели с гидроусилителями и без них, гидроцилиндры с электрогидравлическими усилителями и др. Устройства обратной связи имеют закрепленные на станине и движущихся частях станка датчики, которые с высокой точностью сигнализируют о фактической величине перемещений и подают импульсы в передаточно-преобразующую систему, где они сравниваются с командными импульсами. Такие системы управления безусловно сложнее построенных на механической основе (см. рис. 229), однако они мобильны в переналадке, что позволяет их использовать при

автоматизации не только массового, но и серийного производства. Подробно вопросы расчета и проектирования систем управления станков рассмотрены в гл. 36—40.

§ 3. Универсальные и специальные автоматы в условиях массового производства

Универсальность станков-автоматов и полуавтоматов определяет технические возможности их применения в различных условиях производства. Принято различать следующие станки-автоматы и полуавтоматы: 1) универсальные, которые в пределах данных методов обработки могут быть переналажены на изготовление широкого диапазона деталей, непохожих по форме и размерам; 2) специализированные, которые могут быть переналажены на обработку группы однотипных деталей с идентичными технологическими процессами обработки; 3) специальные, которые создают для обработки только одной конкретной детали, они не могут быть переналажены.

Универсальное автоматическое оборудование используют, как правило, в серийном производстве, специализированное — в крупносерийном и массовом производстве с быстрой сменяемостью объектов, специальное — в массовом производстве со стабильным характером объектов.

На ранних стадиях развития автоматизации основными представителя-

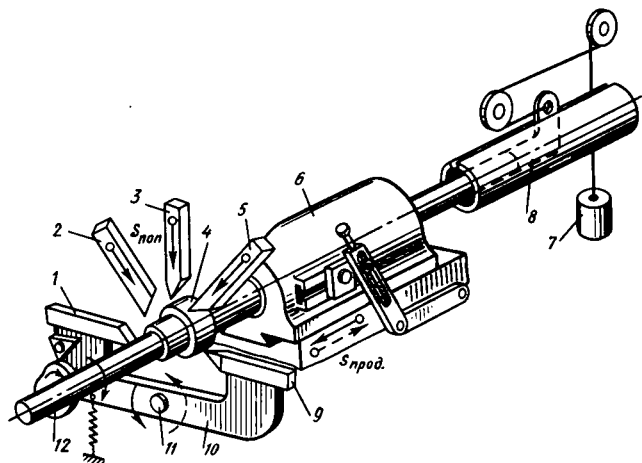


Рис. 231. Схемы работы автомата фасонно-продольного точения:

1, 9 — резцы на качающемся суппорте (балансире); 2, 3, 5 — резцы на верхних поперечных суппортах; 4 — неподвижный люнет; 6 — подвижная шпиндельная бабка; 7 — груз; 8 — направляющая труба для прутка; 10 — балансир; 11 — ось качения балансира; 12 — кулачок

ми универсальных автоматов являлись токарные, с системами управления на базе распределительного вала. Их достоинство — возможность применения в различных отраслях для обработки различных деталей. На рис. 231 показана схема работы автомата фасонно-продольного точения для изготовления деталей диаметром до 10 мм из пруткового материала. Пруток зажимается в подвижной шпиндельной бабке, перемещение которой является рабочей подачей. Обработка производится с поперечных суппортов, скомпонованных на единой стойке. На ней расположен люнет, сквозь который проходит вращающийся пруток. При подаче бабки $S_{\text{прод}}$ и неподвижном суппорте происходит продольная обточка, при одновременной подаче бабки и суппорта — образование конусной поверхности детали. Подача суппортов $S_{\text{поп}}$ при неподвижной бабке позволяет осуществить подрезку, прорезку канавок, отрезку. Автомат имеет осевое приспособление для сверления и нарезания резьбы. В классическом варианте все целевые механизмы автомата (суппорты, приспособления, шпиндельная бабка, механизм зажима и др.) управляются от непрерывно вращающегося распределительного вала — централизованного органа управления рабочим циклом.

Аналогично обеспечивается функционирование многшпиндельных автоматов горизонтального (см. рис. 223)

и вертикального типа, токарно-револьверных и многолезцовых и т. д. Эффективному их применению для автоматизации токарной обработки в условиях серийного производства препятствовала плохая мобильность (время переналадки до 5—8 ч).

Автоматизированное универсальное оборудование с ЧПУ успешно внедряется для осуществления практически всего технологического диапазона механической обработки (от черновых операций отрезки, фрезерования и т. д. до операций шлифования, полирования, зубообработки и т. д.). Первоначально универсальное автоматическое оборудование с ЧПУ создавали на базе соответствующих конструкций и компоновок станков с ручным управлением. Но очень быстро оказалось, что большинство конструктивных решений (направляющие скольжения, пара винт — гайка, асинхронные двигатели и др.), которые создавались и десятилетиями отработывались в условиях системы человек — машина, не могут функционировать во взаимодействии с системами ЧПУ. Им на смену пришли механизмы и устройства аналогичного функционального назначения, но выполненные на новой основе, с иными характеристиками (табл. 17).

Сочетание классических конструктивно-компоновочных решений универсальных автоматов, достаточно отработанных, рациональных и надежных, с новейшими принципами программного управления приводит к появлению

Конструктивные решения различных механизмов в станках с ручным управлением и с ЧПУ

Функциональное назначение механизмов и устройств	Станок	
	с ручным управлением	с ЧПУ
Источник движения	1. Асинхронные двигатели переменного тока 2. Гидроцилиндры с управлением от золотников	1. Двигатели постоянного тока 2. Шаговые двигатели с гидроусилителями 3. Силовые шаговые двигатели 4. Гидроцилиндры с управлением от электрогидравлических устройств (ЭГУ)
Передача вращательного движения	Коробки скоростей и подач с ручным переключением	Безлюфтовые редукторы с электромагнитными муфтами и автоматическим переключением
Преобразование вращательного движения в поступательное	1. Пара винт — гайка 2. Пара шестерня — рейка	1. Шариковая пара винт — гайка 2. Роликовая пара винт — гайка
Возвратно-поступательное движение	Направляющие скольжения	1. Направляющие качения 2. Гидростатические направляющие

комбинированных систем. Так, создание токарно-копировальных полуавтоматов с ЧПУ позволило выполнить все предварительные рабочие ходы по командам от перфоленты, а завершающий, когда окончательно формируется профиль детали, — по копиру.

Создание автоматов фасонно-продольного точения (см. рис. 231) с комбинированной системой управления распределительный вал — программное управление РВ—ПУ позволило, сохранив все традиционные преимущества, сократить время переналадки до 1 ч. Движения суппортов происходят от постоянных кулачков, расположенных на РВ. Однако частотой вращения РВ, его пуском и установками, а также подключением и отключением суппортов от кулачков управляет ПУ, что позволяет получать точно заданные перемещения. Перемещения шпиндельной бабки выполняются от специального шагового двигателя, управляемого от ПУ.

Специальные полуавтоматы и автоматы обязаны своим появлением развитию массового, поточного производства в автомобильной, тракторной, подшипниковой промышленности, приборостроении и др. В специальном

оборудовании, которое проектируют для обработки конкретной детали, могут быть с максимальной эффективностью применены самые рациональные схемы обработки с максимальным совмещением операций, высокие режимы, оптимальные возможности обслуживания и т. д., которые невозможны на обычном универсальном оборудовании.

Так, например, шлифование желоба кольца шарикоподшипника может быть выполнено на универсальном круглошлифовальном станке, где каждое кольцо необходимо напрессовывать на круглую оправку и шлифовать профильным широким кругом при частой правке профиля. Выбор схемы обработки (рис. 232, а) определен тем, что на том же станке шлифуют и множество других деталей, например ступенчатые валы. Если же создавать специальные автоматы для шлифования только желоба внутренних колец подшипников, можно применить иную, более рациональную схему (рис. 232, б). Обработка производится шлифовальным кругом с точечным контактом, геометрическая точность профиля обеспечивается за счет качания бабки изделия вокруг оси, совпадающей с центром окружности желоба. Шлифоваль-

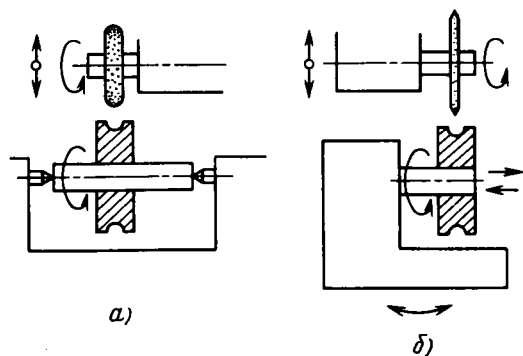


Рис. 232. Схемы обработки желоба внутренних колец шарикоподшипников:

а — на универсальном круглошлифовальном станке; б — на специальном желобошлифовальном автомате

ная бабка имеет движение быстрого подвода и врезания на необходимую глубину. Для схемы, показанной на рис. 232, б, легко решаются вопросы автоматизации загрузки и съема детали, что при универсальной схеме (см. рис. 232, а) затруднительно.

Классическими примерами специального станочного оборудования являются агрегатные станки-полуавтоматы и автоматы, в которых применение многоинструментальной и многопозиционной обработки позволяет повысить производительность в десятки раз по сравнению с универсальным оборудованием, в том числе и с ЧПУ (см. рис. 220, 221). Однако эти преимуще-

ства справедливы только для условий массового производства. Важнейшие недостатки специальных автоматов и полуавтоматов — их высокая стоимость, связанная с тем, что все расходы на проектирование, оснастку для изготовления и сборки распределяются на ограниченное число станков, и длительные сроки поставки, зачастую сопоставимые со сроками выпуска тех или иных изделий. Чтобы избежать этих недостатков, при проектировании широко применяют принципы унификации. Сущность их заключается в том, что специальные автоматы не проектируют каждый раз заново, а komponуют из готовых функциональных элементов широкого назначения.

В многопозиционных агрегатных станках-полуавтоматах (см. рис. 220) нормализованы силовые головки и силовые столы, направляющие, поворотные столы со станинами и приводом периодического поворота, боковые станины и вертикальные стойки, блоки аппаратуры управления и привода (гидростанции и т. п.). Проектируют лишь шпиндельные коробки, приспособления для закрепления деталей, остальные части подбирают по каталогам из гаммы типоразмеров подобно тому, как подбираются двигатели, подшипники, крепежные детали. Схемы компоновки многошпиндельных станков-полуавтоматов приведены на рис. 233.

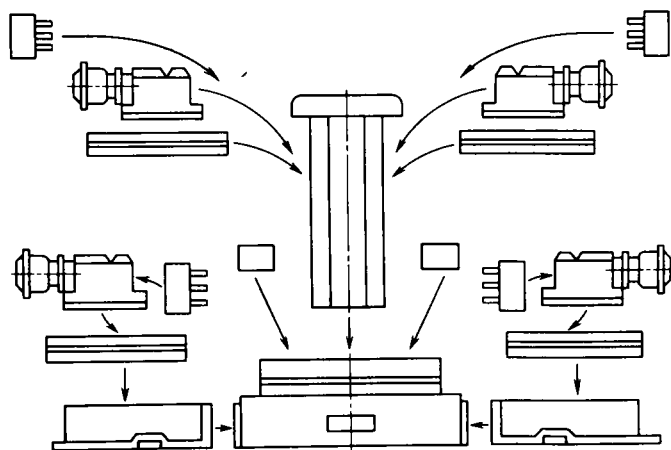


Рис. 233. Компоновки многопозиционных станков-полуавтоматов из нормализованных элементов

§ 1. Процессы функционирования машин во времени

Целевым назначением любой рабочей машины — станка, автомата, или системы машин — автоматической линии — является выпуск годной продукции. С этой точки зрения производительно затраченным может считаться только то время, когда машина функционирует и выполняет заданные процессы обработки, контроля, сборки. Однако реальные процессы функционирования машины во времени достаточно сложны, периоды бесперебойной работы, когда выдается продукция, неизбежно чередуются с периодами простоев по различным причинам технического и организационного характера. Процессы функционирования машин можно рассматривать только в пределах планового фонда времени, когда машина должна работать и либо работает, либо простаивает.

Ни обеденные перерывы, ни ночные смены, ни воскресенья при анализе простоев не учитывают. Рассмотрим процесс функционирования во времени многооперационного станка с числовым программным управлением (рис. 234) в течение некоторого периода времени θ , например полного рабочего дня. На диаграмме (рис. 235) по горизонтали откладываем текущее время θ , а по вертикали — количество выпущенной годной продукции z , шт. Начало координат соответствует моменту начала рабочей смены ($\theta=0$), когда продукции еще нет ($z=0$). Начинается рабочая смена, но продукция не выдается, потому что происходит наладка станка (длительностью θ_1) на обработку данной детали. Затем полуавтомат включается и начинает выдавать продукцию, количество которой пропорционально чистому проработанному времени, однако лишь до некоторого момента, когда возникает отказ,

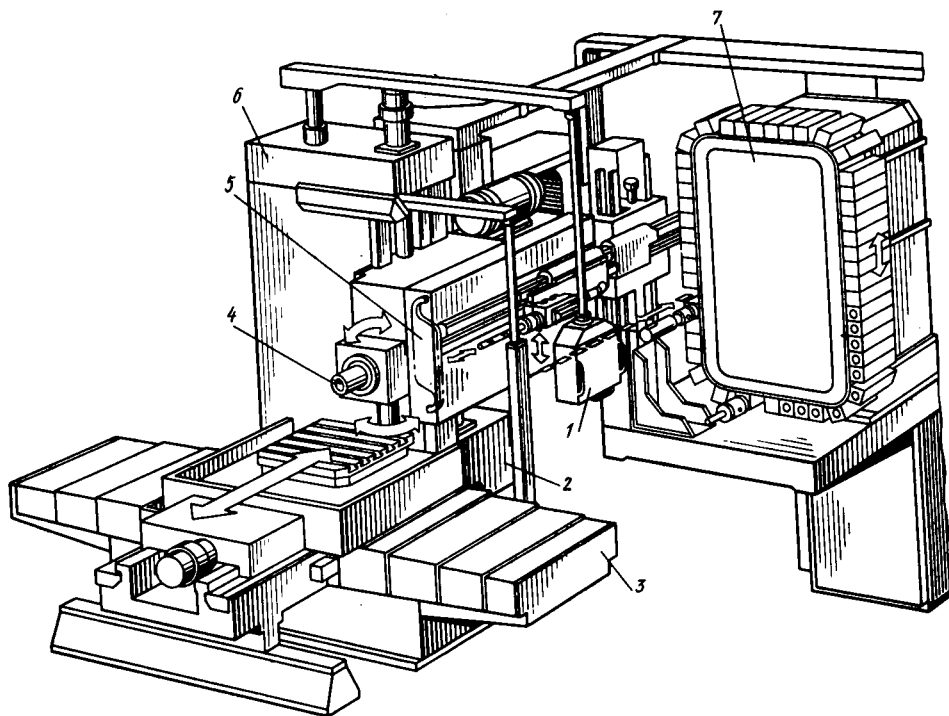


Рис. 234. Многооперационный станок-полуавтомат с ЧПУ:

1 — выносной пульт управления; 2 — станина; 3 — стол; 4 — шпиндель; 5 — автооператор; 6 — стойка; 7 — магазин инструментов

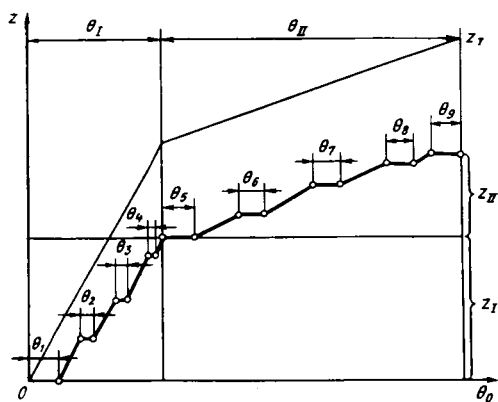


Рис. 235. Диаграмма работы и простоев многооперационного станка-полуавтомата с ЧПУ

например поломка инструмента. Она приводит к простоям полуавтомата с ЧПУ (длительностью θ_2). После восстановления работоспособности станок продолжает работу, однако с вынужденными перерывами длительностью θ_3 и θ_4 , например из-за отсутствия заготовок, неполадок механизмов и устройств, отсутствия рабочего. В итоге станок за календарное время θ_1 полностью обрабатывает заданное количество деталей z_1 , после чего станок должен быть переналажен на выпуск партии других деталей, что типично для условий серийного производства. Сначала следует простой станка-полуавтомата с ЧПУ длительностью θ_5 для переналадки, после чего следует период θ_{II} с чередованием интервалов работы и простоев по различным причинам, например размерная подналадка (θ_6), корректировка программы (θ_7), измерение точности (θ_8), уборка и очистка станка (θ_9). В итоге за период времени θ_0 , взятый в качестве базы наблюдения, на станке будет обработано не z_1 деталей, как это было бы при бесперебойной работе (см. рис. 235), а значительно меньше: $z_1 + z_1$. Аналогичная картина будет наблюдаться для любых видов технологического оборудования — станков, автоматов, автоматических линий — в любые периоды их функционирования, когда они находятся в эксплуатации, а не выведены в планово-предупредительный ремонт. Таким образом, в процессе функционирования

за произвольный период времени θ оборудование может находиться в двух основных состояниях: бесперебойной работы — с суммарной длительностью θ_p , когда оно исправно функционирует, выдавая годную продукцию; простоев — с суммарной длительностью $\Sigma\theta_n$, когда оно не выдает годную продукцию по любым причинам технического и организационного характера, будучи исправным или неисправным, не выдавая продукцию вообще или выдавая бракованную продукцию:

$$\theta = \theta_p + \Sigma\theta_n. \quad (170)$$

При бесперебойной работе следует различать следующие виды затрат времени.

1. Время обработки, когда происходит технологическое воздействие на обрабатываемую деталь, в данном случае — процесс обработки резанием длительностью t_p для каждой единицы продукции;

2. Время холостых ходов, выполняемых механизмами и устройствами машин, не совмещенных с обработкой, в данном случае это (см. рис. 234) быстрые подводы и отводы шпинделя с инструментом, координатные установочные перемещения стола, замена инструмента в шпинделе и т. д. длительностью t_{xx} для каждой единицы продукции при каждом рабочем цикле;

3. Вспомогательное время, длительность процессов, выполняемых рабочим вручную или с помощью средств механизации, не совмещенных по времени ни с рабочими, ни с холостыми ходами цикла; в данном случае (см. рис. 234) это ручная загрузка и зажим заготовок, открепление и съем готовых изделий длительностью $t_{всп}$ в каждом рабочем цикле.

Эти элементы затрат времени и составляют в сумме длительность рабочего цикла T как средний интервал выдачи одной детали при бесперебойной работе [см. формулу (169)].

При бесперебойной работе эти затраты времени носят регулярный характер, суммарное чистое время бесперебойной работы пропорционально количеству выпущенной продукции:

$$\theta_p \sim zT. \quad (171)$$

Если за рабочий цикл машина выдает p деталей, их общее число z за некоторый период бесперебойной работы θ_p составит

$$z = \frac{p \theta_p}{T}. \quad (172)$$

В частном случае, когда за цикл выдается только единица продукции,

$$z = \frac{\theta_p}{T}, \quad (173)$$

отсюда

$$\theta_p = zT = z(t_p + t_{x.x} + t_{всп}). \quad (174)$$

Значительно более сложной является классификационная структура простоев, которые можно разделить на следующие основные категории.

1. Собственные простои длительностью $\Sigma \theta_c$, обусловленные конструкцией оборудования и инструмента, их надежностью в работе, режимами эксплуатации и т. д., т. е. вызванные «внутренними» причинами, к ним относятся смена и регулировка инструмента; ремонт и регулирование механизмов и устройств, устранение отказов; подналадка, уборка и очистка машин; простои из-за брака и т. д. Это время обнаружения, устранения и предупреждения отказов механизмов, устройств, аппаратуры управления, инструментов, оснастки.

2. Организационно-технические простои длительностью $\Sigma \theta_{o.т}$, обусловленные «внешними» причинами, не связанными непосредственно с характеристиками оборудования; к ним относятся отсутствие заготовок, инструментов, электроэнергии, управляющих программ; несвоевременный приход и уход рабочих; измерение деталей, если оно требует остановок оборудования и т. д.

3. Простои для переналадки длительностью $\Sigma \theta_{пер}$, которые занимают промежуточное положение, так как частота и моменты их начала обусловлены организационными причинами (переход на обработку новых изделий, партионность и т. д.), а длительность — техническими причинами; к ним относятся замена управляющих программ; замена комплекта инструмента; замена приспособлений и оснастки; обработка пробных деталей, промежуточные из-

мерения, корректировка программы и т. д.

Таким образом, суммарная длительность простоев

$$\Sigma \theta_{\Pi} = \Sigma \theta_c + \Sigma \theta_{o.т} + \Sigma \theta_{пер}. \quad (175)$$

Суммарный плановый фонд времени функционирования автомата или линии с учетом формул (170), (171), (174)

$$\theta = \theta_p + \Sigma \theta_{\Pi} = z(t_p + t_{x.x} + t_{всп}) + \Sigma \theta_c + \Sigma \theta_{o.т} + \Sigma \theta_{пер}. \quad (176)$$

Классификация основных состояний при функционировании машин-автоматов, которая является единой для любых типов технологического оборудования, приведена на рис. 236.

§ 2. Теоретическая и фактическая производительность

Выпуск продукции в машиностроении имеет обычно штучный характер, время измеряется в календарных единицах: при теоретических расчетах — в минутах, при производственных — в рабочих сменах, сутках, месяцах, годах. Производительность машин является важнейшей характеристикой их полезной отдачи, их функционирования, ее показатели рассчитываются и анализируются в трех формах.

1. Реальная производительность — производительность действующего технологического оборудования, показатели рассчитываются по данным эксплуатационных исследований и их математической обработки.

2. Ожидаемая производительность — производительность проектируемого технологического оборудования, показатели которой прогнозируются, используя расчеты, математическое моделирование и т. д.

3. Требуемая производительность — показатель, который рассчитывают применительно к действующему или проектируемому оборудованию, исходя из данной производственной программы, сменности работы и т. д.

Для количественной оценки производительности Q необходимо общее число изделий z , выпущенных за некоторый период в пределах планового фонда времени, разделить на продол-

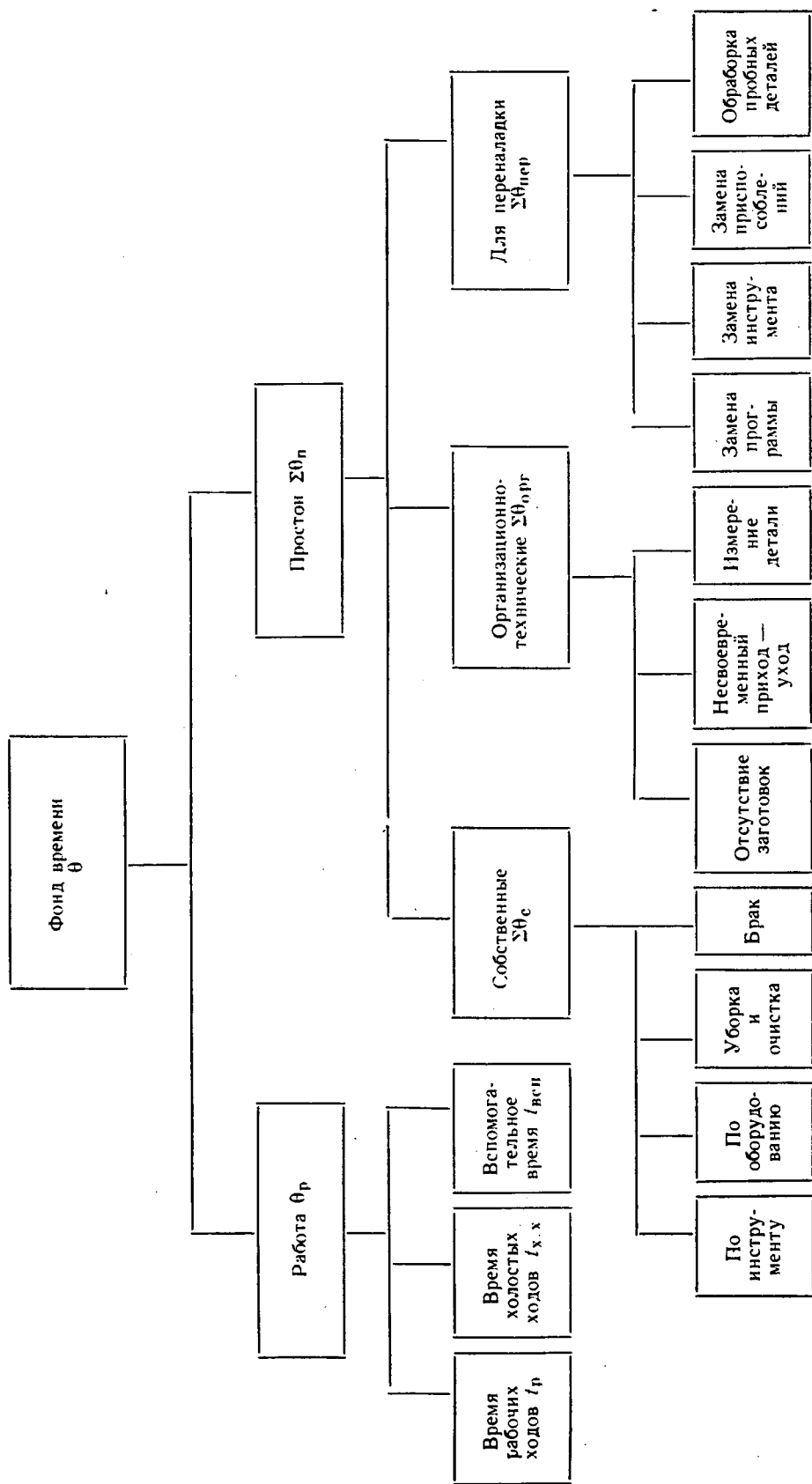


Рис.236. Классификационная схема основных состояний при функционировании машин-автоматов в условиях серийного производства

жительность этого периода θ . С учетом формулы (176)

$$Q = \frac{z}{\theta} =$$

$$= \frac{z}{z(t_p + t_{x.x} + t_{всп}) + \Sigma\theta_c + \Sigma\theta_{o.т} + \Sigma\theta_{пер}} \quad (177)$$

При расчете и анализе производительности автоматов и автоматических линий используют различные категории производительности, которые отличаются количеством и номенклатурой учитываемых элементов затрат времени при функционировании машин.

Технологическая производительность $Q_{техн}$ — это теоретическая производительность машины при условии непрерывного протекания технологического процесса ($t_{x.x} = 0$, $t_{всп} = 0$), абсолютной надежности и полного использования во времени ($\Sigma\theta_n = 0$); используя формулу (177), получим

$$Q_{техн} = 1/t_p. \quad (178)$$

Технологическая производительность характеризует потенциал производительности машины. Так, если согласно разработанному технологическому процессу $t_p = 0,5$ мин, то безо всякой дальнейшей конструктивной разработки ясно, что производительность машины будет меньше 2 шт/мин ($Q_{техн} = 2$ шт/мин), выше она быть не может.

Цикловая производительность $Q_{ц}$ — это теоретическая производительность машины с реальными холостыми ходами ($t_{x.x} > 0$, $t_{всп} > 0$) при ее бесперебойной работе, т. е. при отсутствии простоев ($\Sigma\theta_n = 0$); используя формулы (177 и 178), получим

$$Q_{ц} = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_p + t_{x.x} + t_{всп}} = \frac{Q_{техн}}{Q_{техн}(t_{x.x} + t_{всп}) + 1}. \quad (179)$$

Техническая производительность $Q_{т}$ — это теоретическая производительность машины с реальными холостыми ходами ($t_{x.x} > 0$, $t_{всп} > 0$) и параметрами работоспособности ($\Sigma\theta_c > 0$) при условии обеспечения ее всем необходимым ($\Sigma\theta_{o.т} = 0$, $\Sigma\theta_{пер} = 0$); используя формулу (177), получим

$$Q_{т} = \frac{z}{Tz + \Sigma\theta_c} = \frac{1}{T + \frac{\Sigma\theta_c}{z}} = \frac{1}{T + \Sigma t_c}, \quad (180)$$

где $\Sigma t_c = \frac{\Sigma\theta_c}{z}$ — собственные внецикловые потери — простои, приходящиеся на единицу выпущенной продукции.

Фактическая производительность Q — это производительность машин с учетом всех факторов, всех элементов затрат времени как цикловых (рабочие и холостые хода), так и внецикловых (простои). Преобразуя формулу (177), получим

$$Q = \frac{1}{T + \frac{\Sigma\theta_c + \Sigma\theta_{o.т} + \Sigma\theta_{пер}}{z}} = \frac{\Gamma}{T + \Sigma t_c + \Sigma t_{o.т} + \Sigma t_{пер}} = \frac{1}{T + \Sigma t_n}, \quad (181)$$

где $\Sigma t_{o.т}$ — организационно-технические внецикловые потери как оргтехпростои, отнесенные к единице выпущенной продукции; $\Sigma t_{пер}$ — внецикловые потери из-за переналадки; Σt_n — суммарные внецикловые потери;

$$\Sigma t_n = \Sigma t_c + \Sigma t_{o.т} + \Sigma t_{пер}. \quad (182)$$

Внецикловые потери являются одним из важнейших параметров теории производительности, объективной характеристикой работоспособности машин, условий их эксплуатации, мобильности при переналадке. Они позволяют легко и просто учитывать влияние простоев любых видов на производительность машин таким образом, что простои относятся в среднем к единице выпущенной продукции.

Для расчета времени суммарных внецикловых потерь достаточно простои за произвольный промежуток времени отнести к количеству продукции за тот же промежуток времени:

$$\Sigma t_n = \frac{\Sigma\theta_n}{z}.$$

При эксплуатационных исследованиях точный подсчет числа выпущенных изделий, как правило, затруднен. Поэтому, подставляя в эту формулу значение $z = \theta_p / T$, получим

$$\Sigma t_n = \frac{\Sigma \theta_n}{\theta_p} T, \quad (183)$$

где $\Sigma \theta_n$, θ_p могут быть взяты как процентные величины по балансу затрат фонда времени (см. § 4), а определение длительности рабочего цикла T трудностей не составляет. Аналогично можно получить формулы для определения отдельных видов потерь:

$$\Sigma t_c = \frac{\Sigma \theta_c}{\theta_p} T, \quad \Sigma t_{ог} = \frac{\Sigma \theta_{ог}}{\theta_p} T, \\ \Sigma t_{пер} = \frac{\Sigma \theta_{пер}}{\theta_p} T. \quad (184)$$

Существует и вторая форма внецикловых потерь, когда простой относят не к единице выпущенной продукции, а к единице времени бесперебойной работы машины:

$$\Sigma B = \frac{\Sigma \theta_n}{\theta_p}, \quad B_c = \frac{\Sigma \theta_c}{\theta_p}, \quad B_{ог} = \frac{\Sigma \theta_{ог}}{\theta_p}, \\ B_{пер} = \frac{\Sigma \theta_{пер}}{\theta_p}. \quad (185)$$

Учитывая, что $\theta_p = zT$, между обеими формами выражения внецикловых потерь существует простая связь:

$$\Sigma B = \frac{\Sigma \theta_n}{zT} = \frac{\Sigma t_n}{T}. \quad (186)$$

С учетом рассмотренных форм и категорий существуют 12 разновидностей показателей производительности, например ожидаемая цикловая производительность, требуемая фактическая и др. Далеко не все разновидности широко используются; например, ожидаемые и требуемые значения показателей производительности рассчитывают только по отношению к фактической производительности. Все категории производительности (технологическая, цикловая, техническая, фактическая) рассчитывают и анализируют только для реальной производительности действующего оборудования (табл. 18, прочерки соответствуют малоупотребляемым показателям).

Таблица 18

Категории и формы производительности

Форма	Категория			
	технологическая	цикловая	техническая	фактическая
Реальная	$Q_{техн}$	$Q_{ц}$	Q_t	Q
Ожидаемая	—	—	Q_t	Q
Требуемая	—	—	—	$Q_{тр}$

Различные категории производительности связаны между собой безразмерными коэффициентами, которые характеризуют конструктивное совершенство машин, их надежность в работе, уровень загрузки в процессе эксплуатации и т. д. Так, например, сопоставляя технологическую и цикловую производительность и учитывая формулы (178) и (179), получим

$$Q_{ц} = \frac{1}{T} \frac{t_p}{t_p} = \frac{1}{t_p} \frac{t_p}{T} = Q_{техн} \eta, \quad (187)$$

где η — коэффициент производительности, равный доле времени обработки в рабочем цикле, он является характеристикой конструктивного совершенства машины.

Для машин непрерывного действия $t_{х.х} = 0$, $t_{всп} = 0$, $\eta = 1$, $Q_{техн} = Q_{ц}$. Значение $\eta = 0,7$ означает, что в рабочем цикле 70% занимает обработка, а 30% — холостые ходы и вспомогательное время, следовательно, возможности технологии во времени используются только на 70%.

Сравнивая между собой цикловую и техническую производительности, с учетом формул (179), (180) и (184) получим

$$Q_t = \frac{1}{T + \Sigma t_c} = \frac{1}{T + \frac{\Sigma \theta_c}{\theta_p} T} = \\ = \frac{1}{T} \frac{\theta_p}{\theta_p + \Sigma \theta_c} = Q_{ц} \eta_{тех}, \quad (188)$$

где $\eta_{тех} = \frac{\theta_p}{\theta_p + \Sigma \theta_c}$ — коэффициент технического использования, равный доле времени работы машины при обеспе-

чении ее всем необходимым (при отсутствии организационных простоев); он является характеристикой работоспособности оборудования, одним из важнейших параметров, связывающих производительность машин и их надежность в работе. Например, $\eta_{\text{tex}}=0,8$ означает, что из того времени, когда машина обеспечена всем необходимым для работы (заготовки, управляющие программы, обслуживающий персонал), 80% времени она действительно работает, а 20% простаивает для замены инструмента, устранения отказов механизмов и аппаратуры, уборки и очистки.

Сравнивая между собой цикловую и фактическую производительности, с учетом формул (179), (181) и (183) получим

$$Q = \frac{1}{T + \Sigma t_{\text{п}}} = \frac{1}{T \left(1 + \frac{\Sigma \theta_{\text{п}}}{\theta_{\text{р}}} \right)} = \frac{1}{T} \frac{\theta_{\text{р}}}{\theta_{\text{р}} + \Sigma \theta_{\text{п}}} = \frac{1}{T} \frac{\theta_{\text{р}}}{\theta} = Q_{\text{ц}} \eta_{\text{ис}}. \quad (189)$$

где $\eta_{\text{ис}} = \frac{\theta_{\text{р}}}{\theta}$ — коэффициент использования, равный доле времени, когда машина в пределах планового фонда времени действительно работает. Например, $\eta_{\text{ис}}=0,6$ означает, что машина в итоге 60% работает, а 40% простаивает по любым причинам.

Таким образом, показатели различных категорий производительности связаны между собой через безразмерные коэффициенты следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{ц}} &= Q_{\text{техн}} \eta; \\ Q_{\text{т}} &= Q_{\text{ц}} \eta_{\text{тех}} = Q_{\text{техн}} \eta \eta_{\text{тех}}; \\ Q &= Q_{\text{ц}} \eta_{\text{ис}} = Q_{\text{техн}} \eta \eta_{\text{тех}} \eta_{\text{з}}; \\ Q_{\text{техн}} &> Q_{\text{ц}} > Q_{\text{т}} > Q, \end{aligned} \right\} \quad (190)$$

где $\eta_{\text{з}}$ — коэффициент загрузки, равный доле времени в пределах планового фонда, когда машина (станок, автомат, линия) обеспечены всем необходимым для нормального функционирования.

Все показатели производительности в общем виде являются функциями времени, переменными величинами в процессе функционирования автоматов и автоматических линий. Показатели

требуемой производительности, как правило, повышаются с увеличением производственной программы выпуска изделий. При прогнозировании производительности проектируемых автоматов и линий необходимо учитывать изменение уровня их работоспособности в процессе эксплуатации, в первую очередь снижение жесткости, геометрической точности, виброустойчивости вследствие процессов изнашивания, старения конструкционных материалов и др. Наконец, показатели реальной производительности также не остаются постоянными из-за всего перечисленного комплекса факторов. На рис. 237 показаны типовые зависимости изменения коэффициента использования $\eta_{\text{ис}}$ и коэффициента технического использования $\eta_{\text{тех}}$ в процессе эксплуатации.

Величина $\eta_{\text{ис}}$ в каждый момент определяется отношением требуемой производительности (при выполнении программы выпуска она равна фактической) к цикловой и монотонно растет пропорционально производственной программе. Величина $\eta_{\text{тех}}$ изменяется по более сложному закону — в соответствии с основными периодами эксплуатации автомата или линий:

1) период пуска и освоения (N_I), когда показатели работоспособности невысоки из-за неотработанности технологии, неопытности наладчиков, наличия конструктивных дефектов, дефектов изготовления и сборки;

2) период стабильной эксплуатации (N_{II}), когда показатели работоспособ-

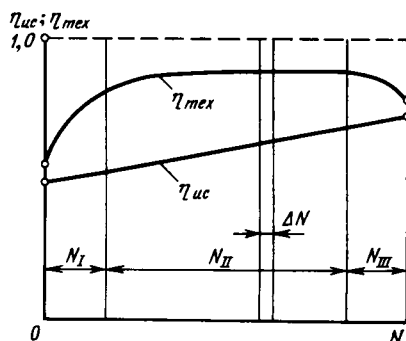


Рис. 237. Графики изменения эксплуатационных показателей автоматизированного оборудования в процессе эксплуатации

ности стабилизируются на некотором уровне, удовлетворяющем производство с позиций качества и производительности;

3) период проявления износа ($N_{\text{из}}$), когда показатели работоспособности снижаются, в первую очередь из-за потери точности обработки; машина выводится в планово-предупредительный ремонт. Эти процессы во времени протекают очень медленно.

Естественно, что за время проведения эксплуатационных исследований $\Delta N = 2 \div 3$ недели (см. гл. 28, § 4) техническое состояние оборудования и условия его эксплуатации не успевают сколько-нибудь заметно измениться. Поэтому все показатели производительности: Q_T , Q , $\eta_{\text{тех}}$, $\eta_{\text{ис}}$, Σt_n , Σt_c и др. — считают условно-постоянными величинами, характеризующими тот или иной период эксплуатации автомата или автоматической линии, «мгновенными» характеристиками процесса функционирования.

§ 3. Производительность в условиях массового и серийного производства

Математическую основу теории производительности составляют уравнения, связывающие показатели производительности с технологическими, структурными, конструктивными и эксплуатационными параметрами машин и их систем. Проще всего эта задача решается для машин, работающих без переналадок в условиях массового производства. Простои и потери на переналадку здесь отсутствуют ($\Sigma \theta_{\text{пер}} = 0$, $\Sigma t_{\text{пер}} = 0$), организационные простои при сравнительном анализе вариантов конструкций и компоновок машин также не учитывают для обеспечения их сопоставимости ($\Sigma \theta_{\text{о.т}} = 0$, $\Sigma t_{\text{о.т}} = 0$); техническая производительность определяется лишь длительностью рабочего цикла и надежностью в работе. При этом для всех автоматов, а также многопозиционных полуавтоматов и автоматических линий вспомогательное время либо вообще отсутствует (когда загрузка автоматическая), либо полностью совмещено с обработкой и в длительности рабочего цикла не учитывается. Их производительность

$$Q = \frac{1}{t_p + t_{x,x} + \Sigma t_c} \quad (191)$$

Для автоматов и полуавтоматов, работающих без переналадок в условиях массового производства, величина всех определяющих факторов (технологических режимов, перемещения и др.) либо постоянна в процессе функционирования ($T = \text{const}$), либо является математическим ожиданием случайной величины в стабильных условиях эксплуатации (Σt_c). Так, в многопозиционном агрегатном станке (см. рис. 220) или автоматической линии (рис. 221) время рабочих ходов равно длительности лимитирующей операции дифференцированного технологического процесса и определяется по общепринятым формулам. Например, для сверления или токарной обработки

$$t_p = \frac{l}{ns} = \frac{\pi d l}{1000 vs},$$

где l — длина рабочего хода, мм; n — частота вращения шпинделя, об/мин; s — подача, мм/об; d — диаметр обрабатываемой детали, мм; v — скорость резания, м/мин.

Время холостых ходов включает быстрый отвод, перевод деталей с позиции на позицию и быстрый подвод суппорта или силовой головки, оно определяется динамическими характеристиками машины.

В агрегатных станках и многошпиндельных автоматах оно составляет не более $t_{x,x} = 3 \div 5$ с, в автоматических линиях $t_{x,x} = 10 \div 15$ с. Собственные внецикловые потери определяются показателями безотказности и ремонтпригодности:

$$\Sigma t_c = \omega_c \tau_b, \quad (192)$$

где ω_c — параметр потока отказов, выраженный в рабочих циклах, 1/цикл; τ_b — среднее время восстановления работоспособности автомата (обнаружения и устранения отказов).

При решении задач анализа и синтеза автоматов и автоматических линий в условиях массового производства величины t_p , $t_{x,x}$ и Σt_c выражаются функционально через параметры машин и их систем (число позиций и потоков обработки, технологические режимы, тип системы управления или транспортной системы, структурная схема линии и др.).

Гораздо сложнее задачи анализа и синтеза машин и их систем по критерию производительности для условий серийного производства. Здесь необходимо учитывать все составляющие затраты времени: потери на переналадку ($\Sigma t_{\text{пер}} \neq 0$) и вспомогательное время ($t_{\text{всп}} \neq 0$), так как и в универсальные станки, и станки с ЧПУ, и станки с прямым цифровым управлением от ЭВМ работают как полуавтоматы — с несомненной ручной загрузкой.

Величина рабочих ходов теряет свою определенность, так как длительность обработки различных деталей неодинакова, аналогично и время холостых ходов. Поэтому производительность машин в условиях серийного производства определяется по формуле (181).

Для решения задач анализа и синтеза машин в условиях серийного производства необходимо иметь показатели производительности в функции следующих определяющих факторов: характеристики комплекта обрабатываемых деталей, их сложности, станкоемкости обработки, технологических режимов и др.; технические характеристики самих станков по быстродействию механизмов холостых перемещений, надежности в работе, длительности вспомогательных процессов, мобильности в переналадке и др.; характеристики условий конкретного производства, которые определяются степенью загрузки данного оборудования, серийностью производства (величиной партий деталей, обрабатываемых между переналадками) и др.

Предположим, что за данным станком или группой однотипных станков закреплен комплект из n различных деталей с различными величинами партий z_i .

Для обработки деталей каждого вида необходимо различное число S_i рабочих ходов, которые выполняют различным числом инструментов A . Время выполнения рабочих ходов t_i различаются как в пределах каждого вида деталей, так и для различных видов. Тогда время рабочих ходов станка при обработке одной детали первого вида

$$t_{p1} = \sum_1^{S_1} t_{i1}, \quad \text{второго} \quad t_{p2} = \sum_1^{S_2} t_{i2} \text{ и т. д.,}$$

при этом $t_{p1} \neq t_{p2}$.

Суммарное время рабочих ходов при обработке деталей всех партий, закрепленных за станком,

$$\theta_p = z_1 t_{p1} + z_2 t_{p2} + z_3 t_{p3} + \dots + z_n t_{pn} = \sum_1^n z_i t_{pi} = \sum_1^n \left(z_i \sum_1^{S_i} t_j \right). \quad (193)$$

За это время было обработано общее число деталей $\sum_1^n z_i = z_1 + z_2 + z_3 + \dots + z_n$.

Общее число элементарных переходов $\Sigma S = S_1 z_1 + S_2 z_2 + S_3 z_3 + \dots + S_n z_n$.

Переходя к среднестатистическим величинам, среднюю длительность рабочих ходов станка, работающего в условиях серийного производства, определяем по формуле

$$t_p = t_{\text{ср1}} S, \quad (194)$$

где $t_{\text{ср1}}$ — среднее время единичного рабочего хода (выполнения элементарного перехода) при обработке комплекта данных деталей, S — среднее число элементарных переходов при обработке одного изделия комплекта.

Для того чтобы получить $t_{\text{ср1}}$, необходимо общее время всех рабочих ходов (всей обработки) разделить на число этих ходов:

$$t_{\text{ср1}} = \frac{\theta_p}{\Sigma S} = \frac{z_1 \sum_1^{S_1} t_{j1} + z_2 \sum_1^{S_2} t_{j2} + \dots + z_n \sum_1^{S_n} t_{jn}}{z_1 S_1 + z_2 S_2 + \dots + z_n S_n}. \quad (195)$$

Аналогично среднее число рабочих ходов определяют делением их общего числа на число обработанных деталей:

$$S = \frac{\Sigma S}{\Sigma z} = \frac{S_1 z_1 + S_2 z_2 + \dots + S_n z_n}{z_1 + z_2 + \dots + z_n}. \quad (196)$$

Время холостых ходов складывается из двух основных составляющих: 1) времени «замены координаты обработки» (быстрый подвод и отвод шпинделя с инструментом, установочное координатное перемещение), которое пропорционально числу элементарных переходов; 2) времени замены инструмента, которое пропорционально числу инструментов, необходимому для обработки данной детали.

Отсюда

$$t_{x,x} = t_{x1}S + t_{x2}A, \quad (197)$$

где $t_{x,x}$ — среднее время холостых ходов станка; t_{x1} — среднее время «замены координаты»; t_{x2} — среднее время замены одного инструмента; A — среднее число инструментов для обработки одной детали комплекта.

Вспомогательное время $t_{всп}$ как время загрузки и съема зависит в основном лишь от типа применяемых приспособлений и в какой-то степени — от размеров деталей.

Собственные внецикловые потери определяются теми же факторами, что и для станков в условиях массового производства, — параметрами безотказности ω_u и восстанавливаемости τ_b ($\Sigma t_c = \omega_u \tau_b$).

Потери на переналадку

$$\Sigma t_{пер} = \frac{\theta_{пер}}{z} = \frac{\theta_1 + \theta_2 S}{z}, \quad (198)$$

где $\theta_{пер}$ — среднее время переналадки; θ_1 — среднее время переналадки станка, не зависящее от технологического маршрута и числа элементарных переходов (замена управляющих программ, замена и выверка приспособления, кинематическая перенастройка, очистка, прогрев); θ_2 — единичная составляющая среднего времени переналадки, пропорциональная числу элементарных переходов (замена комплекта инструментов, обработка и контроль пробной детали, корректировка программы и поднастройка инструмента).

Подставляя все величины из формул (194), (197), (198) в общую формулу для расчета производительности станков в условиях серийного производства (181), получим

$$Q = \frac{1}{t_{сп1}S + t_{x1}S + t_{x2}A + t_{всп} + t_{огр} + \rightarrow + \rightarrow + \omega_u \tau_b + \frac{\theta_1 + \theta_2 S}{z}}. \quad (199)$$

Производительность есть функция различных характеристик.

1. Характеристики обрабатываемых деталей: среднее время одного рабочего хода $t_{сп1}$; среднее число рабочих ходов при обработке единицы изделия данного комплекта S ; среднее

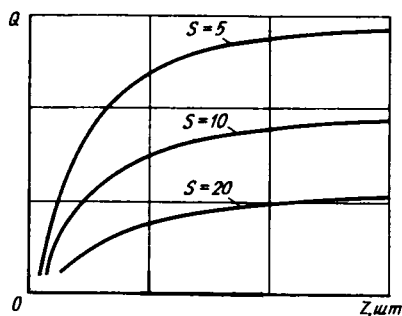


Рис. 238. Зависимость производительности станков с ЧПУ от партионности обработки и характеристик обрабатываемых изделий

число инструментов при обработке единицы изделия A . Величины S , $t_{сп1}$, A — объективные характеристики определенных типоразмеров деталей, их значения могут быть получены либо путем анализа технологической документации, либо путем эксплуатационных исследований (см. § 4).

2. Характеристики конструкции технологического оборудования, самого станка, его быстрой замены, надежности, мобильности: среднее время между двумя обработками — t_{x1} ; среднее время замены инструмента — t_{x2} ; показатели надежности ω_u и τ_b ; среднее время переналадки θ_1 и θ_2 ; среднее вспомогательное время $t_{всп}$.

3. Характеристики условий производства: организационно-технические потери $\Sigma t_{огр}$; средний размер партии деталей, серийности производства z .
Формулы одинаково пригодны для анализа производительности универсальных станков с ручным управлением, станков-полуавтоматов с ЧПУ, с прямым цифровым управлением от ЭВМ, разумеется, в сопоставимых условиях.

На рис. 238 приведена диаграмма зависимости производительности Q станков с ЧПУ от количества проходов при обработке детали S как характеристики ее сложности и размера z партии, которые показывают, что при $z = 100 \div 200$ и более производительность приближается к производительности тех же станков в условиях массового производства ($z = \infty$), а при меньшей партионности — резко падает.

На рис. 239 показана сравнительная диаграмма производительности станков с ручным управлением Q_1 и станков

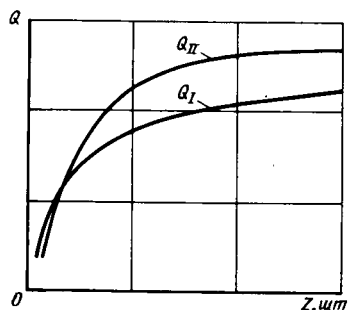


Рис. 239. Графики производительности станков с ручным управлением (Q_I) и числовым программным управлением (Q_{II}) в зависимости от партионности обработки

с ЧПУ Q_{II} в зависимости от серийности производства и среднего размера z партий.

Оба типа станков при обработке корпусных деталей имеют близкие режимы обработки и время рабочих ходов, вспомогательное время загрузки и съема деталей. Станки с ЧПУ дают значительный выигрыш в быстрейдействии при выполнении холостых ходов. Например, среднее время замены инструмента $t_{xI} = 2 \div 2,5$ мин, $t_{xII} = 0,2 \div 0,3$ мин; среднее время координатной переустановки $t_{xI} = 1,0 \div 2,0$ мин, $t_{xII} = 0,15 \div 0,20$ мин. Однако станки с ЧПУ серьезно проигрывают в длительности переналадки ($\theta_{пер I} = 30 \div 50$ мин; $\theta_{пер II} = 90 \div 150$ мин), что особенно сказывается при малой серийности. Поэтому при относительно больших размерах обрабатываемых партий (см. рис. 239) станки с ЧПУ значительно более производительны, чем универсальные, при малых — уступают им.

§ 4. Методы расчета и анализа производительности автоматизированного оборудования

Производственные исследования работоспособности автоматизированного оборудования позволяют решать две основные задачи: 1) количественно рассчитывать резервы повышения производительности и надежности в работе данного оборудования в данных конкретных производственных условиях, оценивать возможную эффективность организационно-технических мероприятий,

направленных на повышение качества и количества выпускаемых изделий; 2) осуществлять «обратную связь» от эксплуатации ранее спроектированного автоматизированного оборудования к последующему проектированию: оценивать перспективность различных технических решений, давать исходные данные для расчета и проектирования нового оборудования аналогичного назначения.

Исследования включают различные этапы фактических наблюдений и измерений, обработки полученной информации, проверки ее достоверности, расчета и параметров работоспособности и их анализа. Их рекомендуется производить поэтапно в следующей последовательности.

1. Изучение технологических процессов, компоновок и конструкции объектов, условий их обслуживания и эксплуатации. Рассмотрим методику на примере анализа работоспособности многооперационных станков-полуавтоматов с ЧПУ для обработки корпусных деталей (рис. 240). Станок имеет вертикальный шпиндель и горизонтальный двухкоординатный стол; инструментальный магазин скомпонован таким образом, что замена инструмента производится без промежуточного носителя (захвата, манипулятора и т. д.) при отведенном до предела вверх шпин-

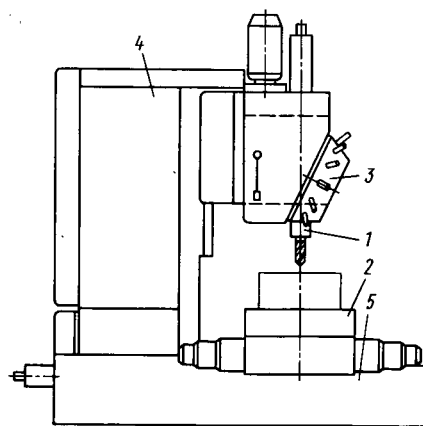


Рис. 240. Многооперационный станок-полуавтомат с ЧПУ для обработки корпусных деталей: 1 — шпиндель с инструментом; 2 — координатный стол с обрабатываемой деталью; 3 — магазин инструментов; 4 — стойка с приводом главного движения; 5 — станина с приводом стола

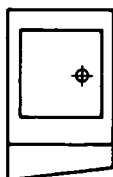
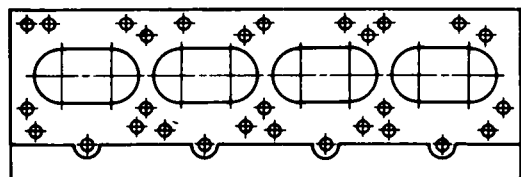


Рис. 241. Типовая корпусная деталь, обрабатываемая на станках с ЧПУ

деле. Полуавтомат управляется от индивидуального пульта, программноноситель — перфолента. Детали, имеющие средние габаритные размеры $400 \times 200 \times 150$ (рис. 241), изготовлены из алюминиевых сплавов; базирование производится по предварительно обработанной нижней плоскости и базовым отверстиям; технологические операции — расточка, фрезерование плоскостей, сверление, зенкерование, развертывание, зенковка фасок. В цехе работает участок из шести одинаковых станков-полуавтоматов, за которыми закреплена обработка 15 наименований деталей, специализации станков не существует, участок работает в две смены. Комплекты инструментов заранее настраиваются на размер на специальном стенде вне станка. Участок эксплуатируется в две смены, партии обрабатываемых деталей подают на участок из соседнего цеха в контейнерных тележках, которые используются и для дальнейшего транспортирования.

II. Анализ и расчет характеристик рабочего цикла и его составляющих — продолжительности рабочих и холостых ходов, вспомогательного времени.

1. Определение длительности t_i единичных рабочих ходов при обработке закрепленного за участком комплекта деталей производят в течение не менее 3—4 рабочих смен по возможности непрерывно на всех станках; аналогично определяют интервалы холостых ходов цикла по двум группам: время между двумя обработками и время замены инструмента, а также продолжительность выполнения вспомогательных ручных операций.

2. Обработка полученных данных, расчет и построение диаграмм распределения; длительности рабочих ходов, числа рабочих ходов, длительности элементарных холостых ходов для «замены координат» обработки, длительности единичных замен инструмента, длительности замен обрабатываемых деталей в приспособлениях. Дан-

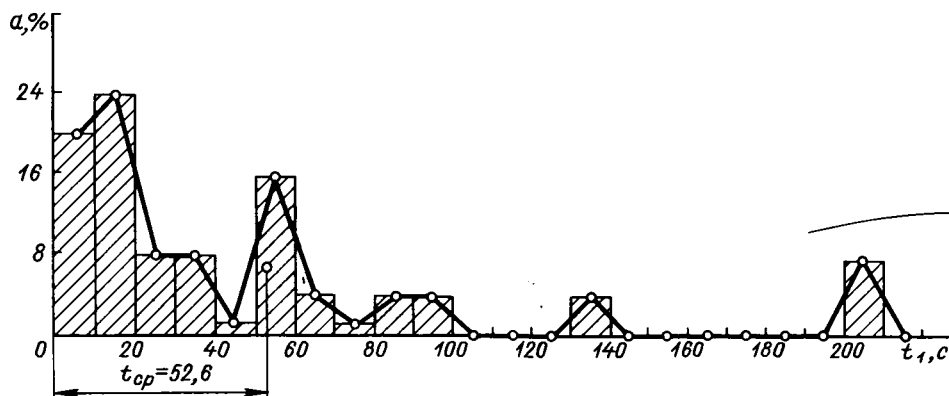


Рис. 242. Статистическая диаграмма распределения длительности единичных ходов при обработке комплекта корпусных изделий (a — число случаев, попавших в интервал длительности обработки)

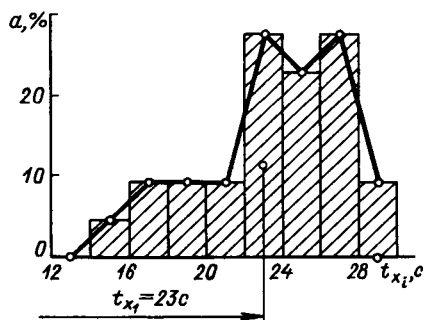


Рис. 243. Статистическая диаграмма распределения длительности единичных холостых ходов при обработке корпусных деталей на станках с ЧПУ

ные систематизируют методами статистической обработки.

На рис. 242 приведена диаграмма распределения длительности t_i рабочих ходов и при обработке деталей на всех шести станках по результатам измерений в течение пяти рабочих смен. Диаграмма обобщает более 6000 единичных значений и достаточно полно характеризует конструктивно-технологические особенности комплекта обрабатываемых деталей и серийность их запуска. Несмотря на все разнообразие методов и режимов обработки, конструктивных особенностей деталей и др., длительность рабочих ходов группируется в довольно узких пределах, так в 24% случаев длительность составила 10—20 с, в 16% случаев — 50—60 с. Средняя длительность рабочего хода при обработке деталей комплекта $t_{icp} = 52,5 \approx 0,9$ мин. Среднее количество рабочих ходов при обработке одной детали $S = 13$. Анализ технологических процессов показал, что в большинстве случаев каждый новый рабочий ход выполняется новым инструментом, т. е. $A = S$. Единичный холостой ход включает быстрый отвод инструмента, его замену, быстрый подвод, координатное перемещение стола. Диаграмма распределения измеренных величин единичных холостых ходов t_{xi} в течение тех же пяти смен наблюдения приведена на рис. 243. Диапазон возможных значений здесь значительно меньше, чем у рабочих ходов (14—30 с), что объясняется идентичностью выполняе-

мых функций и стабильностью скорости холостых перемещений. Полученная среднестатистическая величина среднего времени единичного холостого хода как интервал времени между двумя обработками $t_{x1} + t_{x2} = 24 \text{ с} = 0,4 \text{ мин}$, где t_{x1}, t_{x2} — см. формулу (197), является объективной характеристикой быстродействия станка, его конструктивного совершенства. По аналогичной диаграмме средняя величина вспомогательного времени при обработке одной детали (длительность открепления и съема готовой детали, установки и закрепления новой заготовки) составила $t_{всп} = 1,5$ мин. Таким образом, при обработке деталей данного комплекта с данной серийностью станок с ЧПУ (см. рис. 240) имеет среднестатистическую величину рабочего цикла

$$T = t_{ср1}S + (t_{x1} + t_{x2})S + t_{всп} = \\ = 0,9 \cdot 13 + 0,4 \cdot 13 + 1,5 = 18,4 \text{ мин.}$$

III. Анализ и расчет характеристик функционирования машин во времени, относительной величины работы и простоев. Данный этап является наиболее трудоемким, так как требует проведения эксплуатационных наблюдений за работой оборудования продолжительностью не менее 10—12 рабочих смен и обработки весьма значительного объема полученной информации.

1. Эксплуатационные наблюдения и измерения, в течение которых фиксируют все элементы затрат времени станков: работу, простои, их виды, продолжительность, причины возникновения и способы устранения; число обработанных деталей (годных и бракованных) по всем типам; характеристики точности обработки; занятость наладчиков и операторов в течение смены и т. д.

2. Первичная обработка результатов наблюдений, составление сводной таблицы работы и простоев по всем объектам и рабочим сменам наблюдения с распределением общего времени по видам (состояниям). В соответствии с приведенной на рис. 236 классификацией рекомендуется делить все время наблюдения на следующие категории: суммарное время бесперебойной работы, включающее время обработки и вспомогательное, холостые хода станка; простои по инструменту с дифференциацией по видам (смена из-за поло-

дифференциацией по отдельным механизмам и устройствам, отказы которых послужили причинами простоев; простои из-за организационных причин (отсутствие заготовок, обслуживающих рабочих, управляющих программ, инструмента и т. д.); простои из-за технического обслуживания (уборка и очистка, прогрев на холостом ходу, профилактические осмотры и т. д.); простои из-за брака (все время, затраченное на выпуск бракованной продукции, фактически является простоем); простои из-за переналадки (замена управляющих программ, комплекта инструмента, обработка пробных деталей и т. д.).

3. Проверка достоверности полученных результатов, которая зависит от длительности наблюдений, типичности их периода для нормальной работы станков, погрешности самих наблюдений. По первым двум факторам проверка производится обычными методами теории вероятностей (критерии согласия, доверительные интервалы). Погрешность наблюдений оценивают для каждой рабочей смены, сравнивая измеренные величины простоев $\Sigma\theta_n$ с постоянными $\Sigma\theta'_n$, которые рассчитываются по формуле

$$\Sigma\theta'_n = \theta - \theta_p = \theta - \sum_1^n z_i T_i, \quad (200)$$

где θ — фонд времени наблюдения в течение данной смены; θ_p — истинное время работы оборудования; z_i — число деталей данного вида, изготовленных за смену; T_i — длительность рабочего цикла при обработке деталей данного вида. Рабочие смены, где относительная ошибка наблюдений превышает 10—15%, должны исключаться из дальнейшего рассмотрения.

4. Расчет и построение баланса затрат планового фонда времени, который показывает, какую долю (%) времени оборудование за время наблюдения работало и простаивало по различным причинам. Баланс рассчитывают по данным сводной таблицы работы и простоев, где общее время наблюдения $\theta = 100\%$, изображается в табличной или графической форме (рис. 244). Станки (см. рис. 240) в период исследования работали только 65% времени,

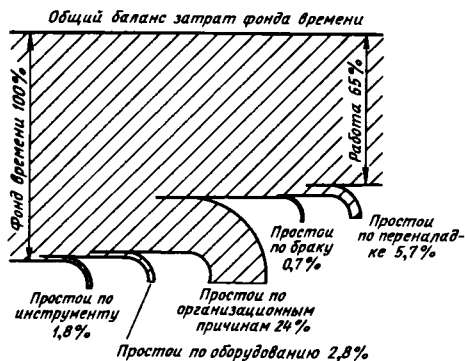


Рис. 244. Баланс затрат планового фонда времени работы участка из станков с ЧПУ

остальное время составили простои, среди которых на первом месте — простои по организационным причинам, далее — простои из-за переналадки.

5. Расчет показателей работоспособности по характеристикам рабочего цикла и баланса затрат планового фонда времени:

А. Собственные внецикловые потери рассчитывают по формуле (184):

$$\Sigma t_c = \frac{\Sigma\theta_c}{\theta_p} T,$$

здесь и в дальнейшем вместо абсолютных величин работы θ_p и простоев $\Sigma\theta_c$ удобнее подставлять относительные величины из баланса затрат фонда времени; для исследуемых станков, учитывая рис. 244, $\theta_p = 65\%$, $\Sigma\theta_c = 1,8 + 2,8 + 0,7 = 5,3\%$, время рабочего цикла $T = 18,4$ мин, отсюда

$$\Sigma t_c = \frac{5,3}{65} 18,4 = 1,5 \text{ мин/шт};$$

Б. Организационно-технические потери $\Sigma\theta_{o.t} = 24,0\%$:

$$\Sigma t_{o.t} = \frac{\Sigma\theta_{o.t}}{\theta_p} T = \frac{24,0}{65,0} 18,4 = 6,8 \text{ мин/шт}.$$

В. Потери на переналадку

$$\Sigma t_{пер} = \frac{\theta_{пер}}{\theta_p} T = \frac{5,7}{65,0} 18,4 = 1,6 \text{ мин/шт}.$$

Однако данное значение $\Sigma t_{пер}$ не является постоянным для станка (как Σt_c) или условий производства (как $\Sigma t_{o.t}$), а зависит в первую очередь от партионности обработки — средней ве-

личины партии z , которая при сравнительном анализе практически всегда выступает как переменная величина. Поэтому потери на переналадку целесообразно рассчитать и по формуле (198):

$$\Sigma t_{\text{пер}} = \frac{\theta_{\text{пер}}}{z} \frac{\theta_1 + \theta_2 S}{z},$$

где θ_1 и θ_2 — составляющие среднего времени переналадки.

Согласно непосредственным наблюдениям в данных условиях и их обработке с помощью диаграмм, аналогичным показанным на рис. 242 и 243, среднее время переналадки $\theta_{\text{пер}} = 2,5 \text{ ч} = 150 \text{ мин}$; средний размер партии изделий $z = 100 \text{ шт}$. Тогда $\Sigma t_{\text{пер}} = \frac{150}{100} = 1,5 \text{ мин/шт}$.

Величины θ_1 и θ_2 целесообразно рассчитывать с помощью корреляционных методов. На диаграмме рис. 245 все измеренные в процессе эксплуатационных наблюдений единичные длительности времени переналадок $\theta_{\text{пер}i}$ нанесены в виде точек по абсциссам, соответствующим количеству элементарных переходов S при обработке деталей. Величины $\theta_{\text{пер}i}$ имеют значительное рассеяние, однако тенденция увеличения длительности переналадок с увеличением сложности обрабатываемых деталей (ростом S) четко видна. Проводя прямую линию с использованием методов математической статистики, получим $\theta_1 = 70 \text{ мин}$; $\theta_2 = 6 \text{ мин}$. Следовательно, время переналадки, не зависящее от технологического процесса, составляет в среднем 70 мин (замена управляющей программы, замена и выверка приспособления, проверка нулевой точки на столе станка, кинематическая перенастройка, прогрев пульта и др.). Время переналадки данного станка, зависящее от технологического процесса, составляет в среднем $6 \cdot 13 = 78 \text{ мин}$ (замена комплекта инструмента, обработка пробной детали, ее контроль, подналадка инструмента или корректировка программы и др.). Показатели $\theta_1 = 70 \text{ мин}$ и $\theta_2 = 6 \text{ мин}$ являются объективными характеристиками мобильности станка, его конструктивного совершенства.

При расчете данным методом внецикловые потери

$$\Sigma t_{\text{пер}} = \frac{\theta_1 + \theta_2 S}{100} = \frac{70 + 6 \cdot 13}{100} = 1,48 \text{ мин/шт}.$$

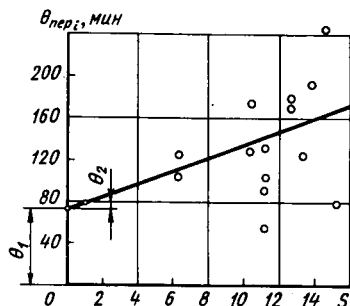


Рис. 245. Корреляционная диаграмма для расчета составляющих длительности переналадки станков с ЧПУ

Г. Коэффициент использования машин оценивают как долю времени работы θ_p в общем фонде времени $\theta = 100\%$. В рассматриваемом случае $\eta_{\text{ис}} = 65\%$.

Д. Коэффициент технического использования рассчитывают по формуле (188) для двух вариантов: без учета времени переналадок и с их учетом:

$$\eta_{\text{тех}} = \frac{\theta_p}{\theta_p + \Sigma \theta_c} = \frac{65,0}{65,0 + 5,3} = 0,92;$$

$$\eta_{\text{тех}} = \frac{\theta_p}{\theta_p + \Sigma \theta_c + \Sigma \theta_{\text{пер}}} = \frac{65}{65 + 5,3 + 5,7} = 0,85.$$

Е. Коэффициент производительности — это доля времени t_p рабочих ходов в цикле T :

$$\eta = \frac{t_p}{T} = \frac{t_{\text{ср}1} S}{T} = \frac{0,9 \cdot 13}{18,4} = 0,64.$$

Таким образом, несмотря на относительно высокое быстродействие станка, обработка составляет только 64% времени цикла, а 36% — холостые ходы и вспомогательное время.

6. Расчет реальной производительности по всем категориям, по характеристикам рабочего цикла и баланса затрат фонда времени (целесообразно рассчитывать сменную производительность).

Технологическая производительность

$$Q_{\text{тех}} = \frac{480}{t_p} = \frac{480}{11,7} = 41 \text{ шт/смену}.$$

Цикловая производительность

$$Q_{\text{ц}} = \frac{480}{T} = \frac{480}{18,4} = 26 \text{ шт/смену}.$$

Техническая производительность $Q_T = Q_{\text{ц}} \eta_{\text{тех}} = 26 \cdot 0,85 = 22 \text{ шт/смена}$.

Фактическая производительность $Q = Q_{\text{ц}} \eta_{\text{ис}} = 26 \cdot 0,65 = 17 \text{ шт/смена}$.

Общее уравнение производительности автомата и автоматической линии должно включать параметры обрабатываемых деталей и условий производства как варьируемые величины в общем виде ($t_{\text{ср}1}$, S , A , $\Sigma t_{0, \text{т}, z}$); параметры самого оборудования как его константы. Тогда уравнение сменной производительности станка-полуавтомата с ЧПУ, показанного на рис. 240, будет иметь вид

$$Q = \frac{480}{(t_{\text{ср}1} + 0,4) S + 1,5 + \Sigma t_{0, \text{т}} + \frac{70 + 6S}{z}}.$$

§ 1. Дифференциация технологического процесса и автоматизация машин как пути повышения производительности

Выше (см. гл. 26) было показано, что основными движущими факторами автоматизации производства являются постоянно растущие требования к качеству и количеству выпускаемой продукции, а также необходимость сокращения числа людей, непосредственно занятых в процессе производства. Именно они определяют формирование и построение всех типов автоматизированного оборудования, начиная с простейшего — универсальных станков.

Универсальные станки с ручным управлением обладают, как правило, весьма широкими технологическими возможностями, что позволяет выполнять значительный технологический объем обработки на одном станке, одной рабочей позиции. Так, ступенчатый вал длиной l , показанный на рис. 246, может быть полностью обработан на универсальном токарном станке. При этом последовательно будут производиться подрезку обоих торцов и их зацентровку, черновую и чистовую обточку всех шеек $1-6$, прорезку всех канавок и снятие фасок. Может быть обеспечена высокая точность обработки, однако производительность будет крайне низкой из-за ограниченных возможностей самого станка и рабочего, который выполняет все вспомогательные работы. Так, если укрупненно считать время обработки каждой элементарной поверхности (кроме фасок) $t_{pi}=1$ мин, то общее время обработки (без совмещения) будет равно суммарной длительности всех переходов: $t'_{p0} = \Sigma t_{pi} = 30$ мин.

Согласно проведенным исследованиям, время технологической обработки в универсальных станках составляет не больше 0,3 штучного времени, остальное занимает установка, закрепление и перезакрепление заготовок, подводы и отводы инструментов, их замена в пределах цикла, установка на

необходимую глубину резания, наконец разжим и съём готовых изделий. Тогда длительность цикла составит ориентировочно $T = \frac{t'_{p0}}{0,3} = \frac{30}{0,3} = 100$ мин $\approx 1,6$ ч, т. е. квалифицированный токарь сможет обработать за смену не более 4—5 деталей, что совершенно неприемлемо при больших масштабах производства.

Одним из путей повышения производительности является дифференциация технологического процесса. Дифференциация технологического процесса заключается в том, что процесс расчленяется на составные части, выполняемые на различных позициях, через которые последовательно проходит каждая деталь, пока не получит полный объем технологического воздействия. Вместо того, чтобы производить полную обработку многими инструментами по очереди в одной позиции (рис. 247, а), технологический объем обработки и комплект инструментов рассредотачивают на q однопозиционных станков (рис. 247, б). Например, на первом токарном станке будет производиться только обработка одного торца, на последнем — прорезка последней канавки или только снятие фасок. Чем больше число позиций, тем меньше время обработки на каждой из них. Если возможна равномерная дифференциация технологического процесса по позициям,

$$t_p = \frac{t'_{p0}}{q}. \quad (201)$$

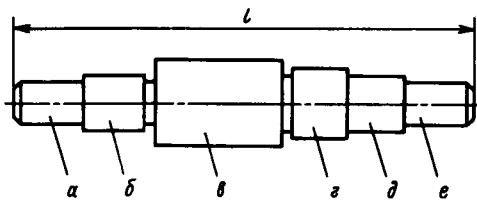


Рис. 246. Типовая обрабатываемая деталь — ступенчатый вал

Одновременно уменьшается и продолжительность холостых ходов цикла. Если, например, для вала при $q=15$ на каждом станке будет обрабатываться лишь одна элементарная поверхность, следовательно, достаточно будет однократного зажима заготовки, однократного отвода инструмента, установка на глубину резания будет постоянной.

Дифференциацию технологического процесса широко применяют в автоматизированном и неавтоматизированном производствах.

Второй путь повышения производительности — автоматизация рабочего цикла машин, создание станков-полуавтоматов и автоматов с тем же сочетанием технологических возможностей, как у станков с ручным управлением, но более высоким быстродействием выполнения отдельных элементов рабочего цикла. Так, токарный многооперационный станок-полуавтомат (рис. 247, в) имеет автоматическую замену инструмента: комплект инструментов, необходимых для обработки данной детали, находится уже не в шкафчике у токаря, а в автоматически действующем инструментальном магазине. Выше было показано, что коэффициент производительности многооперационных станков составляет 0,60—0,70 (примем 0,65). Следовательно, в рассматриваемом примере $T = \frac{t'_{p0}}{0,65} = \frac{30}{0,65} = 46$ мин.

Благодаря автоматизации цикла даже без сокращения длительности обработки производительность повысится более чем в 2 раза.

Дальнейшее повышение производительности достигается сочетанием методов дифференциации технологического процесса и автоматизации рабочего цикла с широким использованием совмещения операций в одной позиции — многоинструментной обработки. И обычные универсальные станки, и многооперационные станки с ЧПУ являются одноинструментными, т. е. в работе одновременно находится только один инструмент комплекта. Но если в станках с ручным управлением такое положение является вынужденным, то станки-автоматы и полуавтоматы могут производить обработку сразу многими инструментами (рис. 247, з). Так, на автоматах можно и целесообразно обрабатывать одновременно оба торца вала (см. рис. 246), все фаски и все канавки, а во многих случаях — сразу несколько шеек с помощью двух или трех копировальных суппортов. Тогда, например, вал может быть обработан на $q=6$ станках, при этом время рабочих ходов составляет лишь $t_p=1$ мин. Холостые хода и вспомогательное время загрузки и съема составляют при этом около 0,5 мин; следовательно, длительность рабочего цикла $T=1,5$ мин.

Таким образом, система из шести полуавтоматов, реализующих диффе-

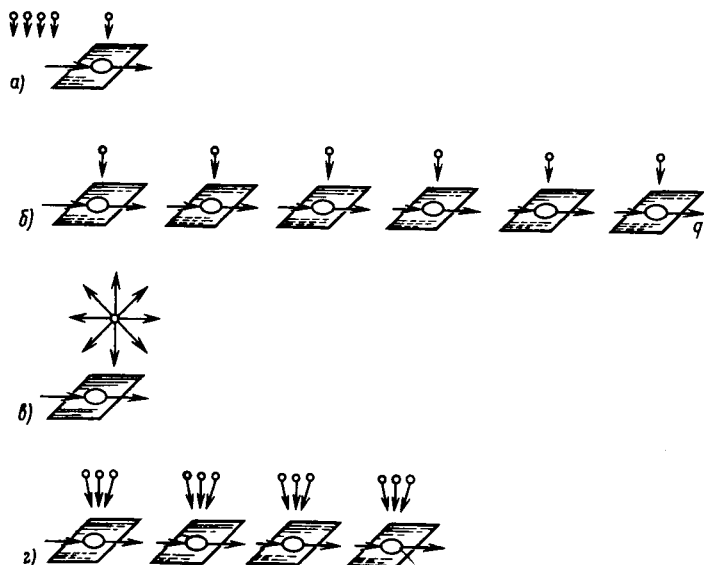


Рис. 247. Структурные схемы технологических машин, выполняющих заданный объем обработки: а — однопозиционный станок, полностью выполняющий технологический процесс; б — группа однопозиционных машин, выполняющих дифференцированный технологический процесс; в — однопозиционный автомат или полуавтомат с концентрацией технологических возможностей; г — группа однопозиционных автоматов с многоинструментной обработкой

ренцированный технологический процесс, оказывается в данном случае в несколько десятков раз производительнее токарного станка.

При равномерной дифференциации объема технологической обработки зависимость рабочего цикла и производительности от степени дифференциации [числа рабочих позиций (станков) q] можно выразить формулами:

$$T = \frac{t_{p0}}{q} + t_x + t_{всп}; \quad Q_u = \frac{1}{\frac{t_{p0}}{q} + t_x + t_{всп}} \quad (202)$$

где t_{p0} — суммарная длительность технологического воздействия на каждую деталь (длительность несовмещенных операций обработки).

При одноинструментной обработке без совмещения t_{p0} будет равно сумме продолжительности всех технологических операций ($t_{p0} = \sum t_{pi}$), при совмещении $t_{p0} < \sum t_{pi}$. Так, при обработке ступенчатого вала (рис. 246) на автоматах она будет включать время обработки одного торца, одной канавки, будет совмещена операция обработки фасок, поэтому $\sum t_{pi} = 30$ мин, $t_{p0} = 27$ мин. График зависимости $Q_u = f(q)$, приведенный на рис. 248, показывает, что дифференциация технологического процесса позволяет резко уменьшить время обработки в каждой позиции, однако непропорционально числу позиций. При незначительной степени дифференциации длительность цикла и производительность все более определяются длительностью несовмещенных холостых ходов цикла: $Q_{u \max} =$

$$= \lim_{q \rightarrow \infty} Q_u = \frac{1}{t_{x,x}}$$

В реальной практике автоматизации процессов дискретного производства трудно обеспечить равномерную дифференциацию технологического процесса по позициям. Кроме того, всегда существует технологически минимальное и максимальное число позиций. Минимально возможное число позиций $q_{\min}$ определяется возможностями встраиваемого технологического оборудования. Так, фрезерование и зацентровка могут выполняться на фрезерно-центровальных станках, наружная

обточка — на токарно-копировальных, многолезцовых и т. д. Максимально возможное число позиций $q_{\max}$ определяется невозможностью дальнейшей дифференциации технологического процесса из-за потери качества изделий. Так, нельзя дробить на части чистовую обточку точных поверхностей, ибо на поверхности остаются ступеньки, которые не устраняются последующим шлифованием.

Рассмотрим изменение длительности обработки при различной степени дифференциации технологического процесса на конкретном примере. Для ступенчатого вала (см. рис. 246) после разработки технологического процесса рассчитана длительность обработки t_{pi} всех элементарных поверхностей (табл. 19).

Общая длительность цепочки несовмещенных операций $t_{p0} = 2,58$ мин (не учтено лишь снятие фасок, которое производят вместе с прорезкой канавок).

Пример. Рассчитаем для каждого варианта дифференциации $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ длительность рабочих ходов цикла $t_p(q)$ как время наиболее продолжительной обработки на одной позиции. Оборудование — фрезерно-центровальные и токарно-копировальные одноступенчатые токарные полуавтоматы. Минимально возможное число позиций $q_{\min} = 4$. Распределение технологического процесса по позициям будет следующим:

поз. I — фрезерование и зацентровка торцов, $\sum t_i = 0,25 + 0,15 = 0,40$ мин;

поз. II — черновая и чистовая обточка шеек $a, b, в$ (с поворотным копиром), $\sum t_i = 0,10 + 0,10 + 0,25 + 0,12 + 0,12 + 0,30 = 0,99$ мин;

поз. III — черновая и чистовая обточка шеек $г, д, е$, $\sum t_i = 0,20 + 0,10 + 0,12 + 0,12 + 0,15 + 0,25 = 0,94$ мин.;

поз. IV — прорезка канавок и снятие фасок (совмещенные во времени), $\sum t_{pi} = 0,25$.

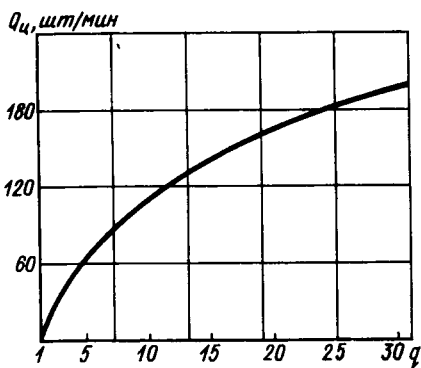


Рис. 248. Зависимость цикловой производительности от степени дифференциации технологического процесса

Длительность рабочих ходов при обработке вала (рис. 246)

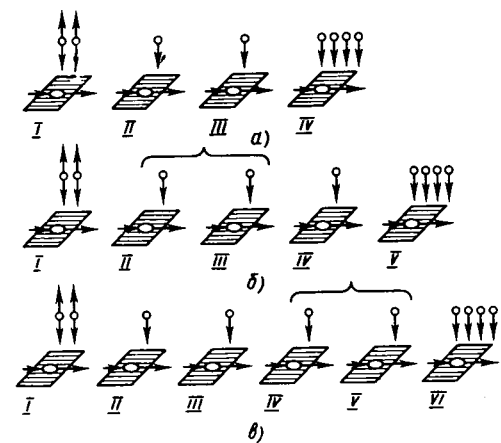


Рис. 249. Структурные схемы технологических систем машин с дифференцированным технологическим процессом:

а — при обработке на $q=4$ позициях; б — при обработке на $q=5$ позициях, в — при обработке на $q=6$ позициях

Наиболее длительным при $q=4$ будет время обработки на позиции II: $\Sigma t_{pi}=0,99$ мин, следовательно, $t_p(4)=0,99$ мин. Как видно, суммарная длительность несовершенных операций (технологического воздействия) t_{po} дифференцируется по позициям явно неравномерно: $\frac{t_{po}}{4}=0,65$ мин, $t_p(4) > \frac{t_{po}}{4}$.

Дальнейшая дифференциация при $q > q_{min}$ заключается в том, что объем обработки на лимитирующей операции делят на две части (рис. 249, б и табл. 20). Так, при $q = (q_{min} + 1) = 5$ распределение технологического процесса будет следующим:

поз. I — фрезерование и зацентровка торцев, $\Sigma t_i=0,40$ мин;

поз. II — черновая обточка шеек а, б, в, $\Sigma t_i=0,10+0,10+0,25=0,45$ мин; поз. III — чистовая обточка шеек а, б, в, $\Sigma t_i=0,12+0,12+0,30=0,54$ мин;

поз. IV — черновая и чистовая обточка шеек в, г, д, $\Sigma t_i=0,94$ мин.

Номер рабочего хода	Рабочий ход	t_{pi} , мин
1	Фрезерование торцов	0,25
2	Зацентровка торцов	0,15
3	Черновая обточка шейки:	
4	а	0,10
5	б	0,10
6	в	0,25
7	г	0,20
8	д	0,10
9	е	0,12
	Чистовая обработка шейки:	
10	а	0,12
11	б	0,12
12	в	0,30
13	г	0,12
14	д	0,15
15	е	0,25
16	Прорезка канавок	0,25
	Снятие фасок	0,05

поз. V — прорезка канавок и снятие фасок, $\Sigma t_i=0,25$ мин. Как видно, обработка на лимитирующей в предыдущем случае позиции распределена на две (неравные) части, лимитирующей во времени стала поз. IV, $\Sigma t_{pi}=0,94$ мин, следовательно, $t_p(5)=0,94$ мин. Суммарная длительность технологического воздействия на одну деталь не изменилась ($t_{po}=2,58$ мин), лишь обработка, выполняемая ранее одним инструментом (поз. II), распределена на две позиции.

При $q=6$ на две части делят обточку шеек г, д, е, таким образом отпадает необходимость в поворотных копирах — на каждом из копировальных полуавтоматов будет выполняться либо черновая, либо чистовая обточка (рис. 249, в): поз. I — $\Sigma t_i=0,40$ мин;

Таблица 20

Длительность (мин) обработки на позициях при различной степени дифференциации технологического процесса

q	Σt_i на позиции											$t_p(q)$	$\frac{t_{po}}{q}$
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI		
4	0,40	0,99	0,94	0,25	—	—	—	—	—	—	—	0,99	0,65
5	0,40	0,45	0,54	0,94	0,25	—	—	—	—	—	—	0,94	0,52
6	0,40	0,45	0,54	0,42	0,52	0,25	—	—	—	—	—	0,54	0,43
7	0,40	0,45	0,24	0,30	0,42	0,52	0,25	—	—	—	—	0,52	0,37
8	0,40	0,45	0,24	0,30	0,42	0,27	0,25	0,25	—	—	—	0,45	0,33
9	0,40	0,20	0,25	0,24	0,30	0,42	0,27	0,25	0,25	—	—	0,42	0,29
10	0,40	0,20	0,25	0,24	0,30	0,20	0,22	0,27	0,25	0,25	—	0,40	0,26
11	0,25	0,15	0,20	0,25	0,24	0,30	0,20	0,22	0,27	0,25	0,25	0,30	0,24

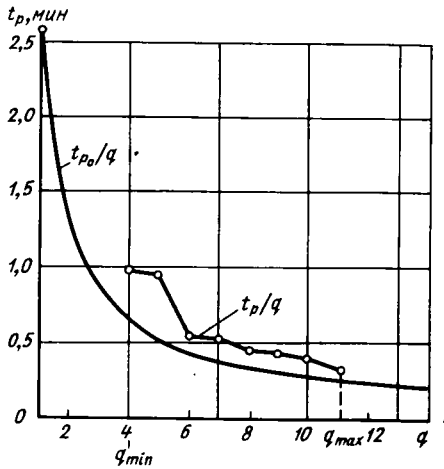


Рис. 250. Зависимость времени рабочих ходов от числа рабочих позиций при равномерной и неравномерной дифференциации технологического процесса по позициям

поз. II — $\Sigma t_i = 0,45$ мин; поз. III — $\Sigma t_i = 0,54$ мин; поз. IV — $\Sigma t_i = 0,42$ мин; поз. V — $\Sigma t_i = 0,52$ мин. В этом случае $t_p(6) = 0,54$ мин.

Продолжая аналогичные расчеты, получим дискретные данные зависимости $t_p(q)$, сведенные в табл. 20. Здесь же для сравнения приведены значения длительности рабочих ходов цикла при равномерной дифференциации технологического процесса.

Максимальное число позиций $q_{\max}$ будет соответствовать варианту, когда лимитирующим по длительности станет чистовая обточка шейки в $t_i = 0,30$ мин. Так как ее нельзя делить на части по соображениям точности обработки, процесс дифференциации прекращается, таким образом $q_{\max} = 11$, $t_p(11) = 0,30$ мин (см. табл. 20).

Заметим, что при $q_{\max} = 11$ на некоторых позициях обрабатывается по две поверхности. Таким образом, возможное число вариантов системы машин по признаку дифференциации технологического процесса — 8 ($4 < q < 11$). Графики зависимости времени рабочих ходов цикла t_p от степени дифференциации технологического процесса: теоретическая t_{p0}/q и реальная t_p/q приведены на рис. 250.

Принципы дифференциации технологического процесса, многоинструментной обработки и автоматизации рабочего цикла лежат в основе построения всех современных полуавтоматов и автоматов.

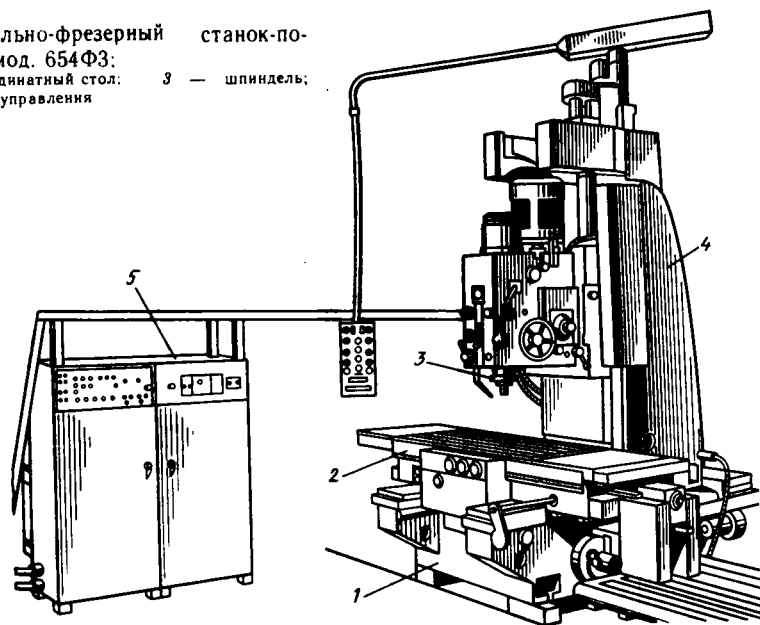
Однопозиционные автоматы и полуавтоматы с одноинструментной обработкой отличаются тем, что в машине одновременно можно обрабатывать, контролировать или собирать только одну деталь и при этом одновременно в действии может находиться только один инструмент. Такие станки бывают однооперационными, когда технологическое воздействие сводится вообще к обработке лишь одним инструментом, и многооперационными, когда станок имеет комплект инструментов, работающих поочередно.

Однопозиционные автоматы и полуавтоматы с одноинструментной обработкой широко применяются в машиностроении. Они могут быть универсальными и специальными, с самыми различными системами управления (с распределительным валом, копировальными, с ЧПУ и т. д.). К станкам этого типа относятся большинство шлифовальных, фрезерных, протяжных автоматизированных станков, особенно специального назначения (круглошлифовальные, бесцентрово-шлифовальные, копировально-фрезерные, вертикально-протяжные и т. д.).

На рис. 234 был показан полуавтомат с ЧПУ, на котором можно обрабатывать корпусные детали. Станок имеет стол с двухкоординатным перемещением, на котором устанавливают обрабатываемую деталь. Имеется магазин инструментальных державок с предварительно настроенными на размер инструментами, замена которых производится автоматически. Программа работы задается с пульта управления, программноноситель — перфолента. Выполняемые операции — фрезерование, расточка, сверление, зенкерование, нарезание резьбы и т. д., т. е. полный комплекс технологических элементов, достаточный для обработки сложных деталей. В отличие от него фрезерный станок-полуавтомат с ЧПУ, показанный на рис. 251, имеет лишь один инструмент (фрезу), что является достаточным для последовательной обработки разнообразных плоскостей, уступов, платиков, окон и т. д.

Применение однопозиционных и одноинструментных станков-автоматов и

Рис. 251. Вертикально-фрезерный станок-полуавтомат с ЧПУ мод. 654ФЗ:
1 — станина; 2 — координатный стол; 3 — шпиндель;
4 — стойка; 5 — пульт управления



полуавтоматов позволяет реализовать в первую очередь те преимущества автоматизации, которые связаны с более высокой скоростью выполнения холостых ходов. Совмещение рабочих ходов отсутствует, совмещение холостых ходов носит эпизодический характер. Так, в многооперационных станках с ЧПУ для обработки корпусных деталей (см. рис. 234) возможно совмещение операций замены инструмента и координатной переустановки стола, замены деталей в приспособлении — с обратной перемоткой перфоленты. Некоторые станки имеют двухпозиционный поворотный стол. Пока в одной позиции стола обрабатывается деталь, во второй может выполняться замена уже обработанных. В этом случае вспомогательное время полностью совмещается с обработкой и на длительность рабочего цикла уже не влияет. Однопозиционные автоматы с одноинструментной обработкой широко используют в серийном производстве.

§ 3. Однопозиционные автоматы с многоинструментной обработкой

Применение однопозиционных автоматов с многоинструментной обработкой (см. рис. 247, 2) позволяет повысить производительность по сравнению с обычными станками не только

за счет ускорения холостых ходов цикла, но в первую очередь — за счет совмещенных операций.

На рис. 252 показана рабочая зона токарного гидрокопировального полуавтомата, оснащенного несколькими копировальными и поперечными суппортами с независимой работой. Каждый суппорт управляется специальным копиром, который обеспечивает необходимое сочетание продольного (задающего) и поперечного (копировального) перемещений. Наличие даже двух копировальных суппортов позволяет дифференцировать общую длину обработки и тем самым сократить время рабочего цикла. Поперечные суппорты могут производить не только подрезку торцов, снятие фасок, но и продольную обточку цилиндрических участков. В однопозиционных агрегатных станках, оснащенных шпиндельными коробками, возможна обработка детали десятками инструментов, при этом одновременно с нескольких сторон несколькими силовыми головками (рис. 253).

Первоначально однопозиционные автоматы и полуавтоматы создавались в основном для условий массового и крупносерийного производства на базе систем управления с распределительным валом (автоматы фасонно-продольного точения), копировальных (гидрокопировальные полуавтоматы), по упорам (агрегатные станки-полу-

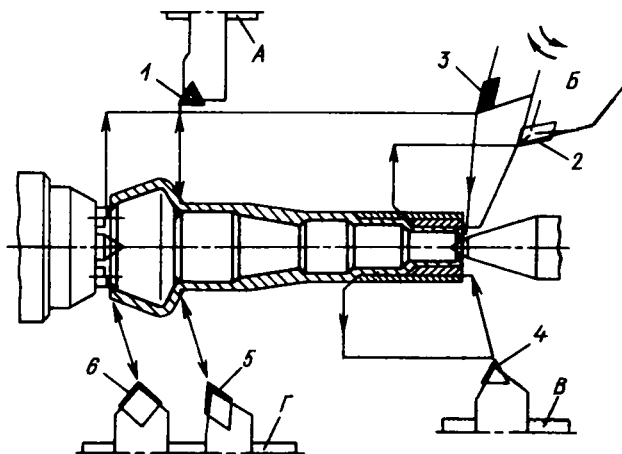


Рис. 252. Рабочая зона токарного гидрокопировального полуавтомата, оснащенного несколькими суппортами:

1—6 — номера резцов; А—Б — суппорта

автоматы). Применение этих систем управления, а также многоинструментных головок делает переналадку затруднительной, а порой и невозможной. Так, агрегатные станки по существу не переналаживаются и используются как специальное оборудование для обработки одной детали. Переналадка автоматов фасонно-продольного точения и токарно-револьверных занимает несколько часов. Поэтому создают станки такого типа с системами ПУ и даже прямым цифровым управлением от ЭВМ. Это позволяет объединить все преимущества, достигаемые отработанными, рациональными компоновками станков по качеству деталей, жесткости и виброустойчивости и т. д. с возможностями быстрой переналадки, высокой мобильности, что обеспечивает их эффективное использование в условиях не только массового, но и серийного производства.

Сравним производительности однооперационных и многооперационных станков с ЧПУ в условиях серийного производства. Конкурирующими вариантами являются: 1) группа из p параллельно работающих многооперационных станков, каждый из которых полностью выполняет заданный объем обработки длительностью $t_{p0} = \sum t_{pi}$ (см. рис. 254, а); 2) группа из q работающих последовательно однооперационных станков с ЧПУ, которые реализуют дифференцированный технологический процесс, в первом приближении, рав-

номерно, т. е. $t_p = \frac{t_{p0}}{q}$ (см. рис. 254, б).

Сравнение является правомерным при $p = q$.

Согласно общим положениям (гл. 28), техническая производительность автоматизированного оборудования в условиях серийного производства определяется длительностью рабочих и холостых ходов цикла, надежностью в работе, партионностью обработки. Пренебрегая потерями по надежности ($\sum t_c = 0$), из-за их небольшой величины (см. гл. 28, § 4) и считая, что при каждом новом переходе меняется и инструмент, согласно формуле (199) получим для системы из p многооперационных станков с ЧПУ

$$Q_1 = \frac{p}{t_{p0} + t_{всп} + t_{x1}S + \frac{\theta_1 + \theta_2 S}{z}}, \quad (203)$$

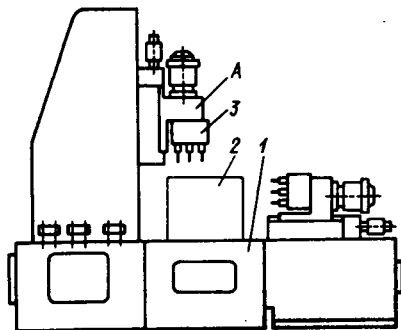


Рис. 253. Многошпиндельный однопозиционный агрегатный станок-полуавтомат:

1 — станина; 2 — приспособления для закрепления обрабатываемых деталей; 3 — шпиндельная коробка; А — силовая головка

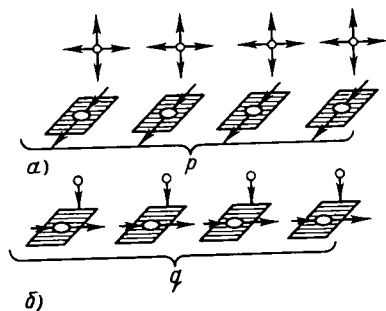


Рис. 254. Структурные схемы технологических систем из многооперационных (а) и однооперационных (б) станков с ЧПУ

где $t_{p0} = t_{p1}S$ — средняя длительность обработки одной детали комплекта, закрепленного за станками; t_{x1} — средняя составляющая времени холостого хода (подвод и отвод инструмента, координатная переустановка).

Время обработки детали, суммарное время холостых ходов, длительность переналадки, пропорциональная числу переходов в однооперационных станках, в q раз будет меньше. В итоге производительность выпускного станка

$$Q_2 = \frac{1}{\frac{t_{p0}}{q} + t_{всп} + t_{x1} \frac{S}{q} + \frac{\theta_1 + \theta_2 S/q}{z}} \quad (204)$$

Пример. При $p = q = 4$, $t_{p0} = 20$ мин, $t_{x1} = 0,2$ мин, $\theta_1 = 20$ мин, $\theta_2 = 5$ мин, $S = 20$; переменных значениях $t_{всп}$ и z , уравнения производительности для обоих вариантов примут вид

$$Q_1 = \frac{4}{24 + t_{всп} + \frac{120}{z}};$$

$$Q_2 = \frac{1}{6 + t_{всп} + \frac{45}{z}}.$$

Уравнение относительной производительности

$$\varphi = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{4 \left(6 + t_{всп} + \frac{45}{z} \right)}{24 + t_{всп} + \frac{120}{z}} =$$

$$= \frac{24 + 4 t_{всп} + \frac{180}{z}}{24 + t_{всп} + \frac{120}{z}} \quad (205)$$

При $t_{всп} = 5$ мин $\varphi \cong 1,5$ раза, при $t_{всп} = 10$ мин $\varphi \cong 1,85$ раза.

Расчеты по уравнению (205) для различных значений вспомогательного времени $t_{всп}$ и размеров партии деталей z показывают, что группа многооперационных станков с ЧПУ всегда более производительна, чем эквивалентная группа однооперационных станков, особенно при большой длительности загрузки и съема деталей. Основной выигрыш в производительности получается за счет того, что в многооперационных станках этот процесс происходит лишь один раз, а в однооперационных станках — по числу станков; имеется выигрыш и за счет уменьшения суммарной длительности переналадок. Величина выигрыша (относительная производительность) зависит от серийности производства.

Глава 30 Принципы построения многопозиционных автоматов и автоматических линий

§ 1. Концентрация операций как основа создания многопозиционных машин

Как было показано выше (см. гл. 26) важнейшим источником получения технического и экономического эффекта при создании автоматизированного технологического оборудования является совмещение операций, важнейшим компонентом которого является использование метода концентрации операций.

Концентрацией операций называется объединение составных частей дифференцированного технологического процесса в одной многопозиционной маши-

не или автоматической линии. Количественной характеристикой степени концентрации операций является число рабочих позиций машины, где одновременно или со смещением по времени работает определенное число обрабатывающих инструментов. Если дифференциация технологического процесса на составные части известна еще со времени мануфактурного производства, концентрация операций — неотъемлемый признак автоматизированного производства, так как вручную управлять одновременно многими механизмами и инструментом нельзя.

Как было показано выше (см. гл. 29, § 1) увеличение степени дифференциации технологического процесса даже в идеальном случае (без учета надежности и переналадок) не обеспечивает пропорционального роста производительности оборудования, а имеет асимптотический характер (см. рис. 248). Поэтому необходимый уровень программы выпуска можно обеспечить установкой p параллельных технологических систем машин, каждая из которых имеет q однопозиционных автоматов или полуавтоматов (рис. 255, а). Таким образом, можно увеличить выпуск деталей (производительность системы машин) до любого требуемого уровня, однако с инженерной точки зрения такое решение нерационально, так как система из многих однопозиционных машин в целом сложна и дорога, занимает большую площадь. Естественным является стремление к концентрации операций, к конструктивному объединению отдельных рабочих позиций, которое может производиться «вдоль» или «поперек» технологического потока или «комбинированно» (см. рис. 255, б, в, г).

В машинах последовательного действия концентрируются разноименные операции дифференцированного технологического процесса, последовательно выполняемые применительно к каждому изделию (рис. 255, б).

В машинах параллельного действия концентрируются одноименные (сходные) операции дифференцированного технологического процесса (рис. 255, в), которые, как правило, являются одинаковыми (например, в условиях массового производства). На каждом станке параллельного действия выполняется, как правило, одна составная операция дифференцированного технологического процесса и не более двух-трех совмещенных с ней. Каждая деталь проходит только одну рабочую позицию, для полного выполнения заданного технологического маршрута необходимо иметь q последовательно работающих машин параллельного действия (см. рис. 255, в).

В машинах последовательно-параллельного (смешанного) действия концентрируются и разноименные, и одноименные операции (рис. 255, г). Каждая машина имеет p параллельных,

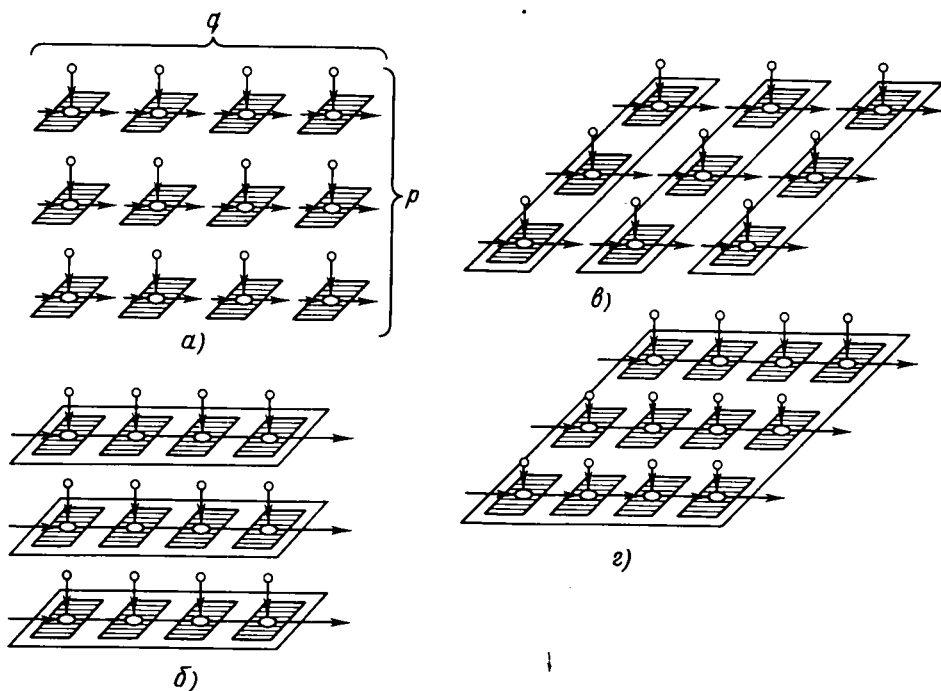


Рис. 255. Схемы технологических систем машин с дифференцированным технологическим процессом:

а — группа однопозиционных машин с p параллельными потоками обработки; б — автоматы последовательного действия; в — автоматы параллельного действия, г — автоматы последовательно-параллельного действия (смешанного действия)

конструктивно взаимосвязанных потоков обработки, в каждом из которых технологический процесс дифференцирован на q частей. Такая схема является наиболее сложной, по ней строятся преимущественно автоматические линии.

Как правило, любая машина с фиксированным общим числом позиций может быть построена по всем трем схемам — последовательного, параллельного и смешанного действия. Так, шестишпиндельный автомат может быть построен по следующим вариантам: 1) $q=6, p=1$ — последовательного действия; 2) $q=3, p=2$ — смешанного действия; 3) $q=2, p=3$ — смешанного действия; 4) $q=1, p=6$ — параллельного действия. Число возможных вариантов возрастает с увеличением числа позиций.

§ 2. Автоматы и линии последовательного действия

В машинах последовательного действия концентрируются разноименные операции технологического процесса, последовательно выполняемые для каждого объекта (изделия). Машина имеет

один технологический комплект инструмента, рассредоточенный по q рабочим позициям (рис. 256, а). Конструктивным признаком машин последовательного действия является наличие стационарных рабочих зон — позиций, оснащенных необходимыми механизмами и инструментами. Последовательно перемещаясь из позиции в позицию, из одной рабочей зоны в другую, каждая деталь получает необходимый объем технологического воздействия. При этом окончательное формирование качества происходит только на последней, выпускаемой позиции.

По характеру транспортных перемещений деталей (см. рис. 256, а) станки последовательного действия делят на дискретные и непрерывные. В станках дискретного последовательного действия транспортные перемещения деталей дискретны (из позиции в позицию). Во время обработки детали закреплены и могут совершать лишь вращательные движения, все движения подачи осуществляются механизмами рабочих ходов с инструментами.

В машинах непрерывного последовательного действия транспортные пе-

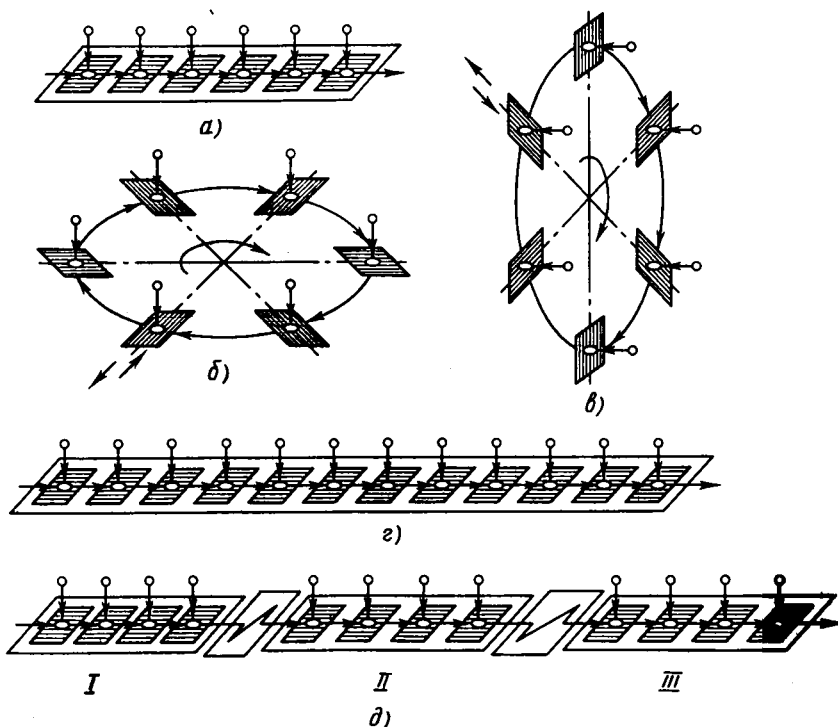


Рис. 256. Структурно-компоновочные варианты автоматов и автоматических линий последовательного действия:

I, II, III — номера участков

перемещения непрерывны, детали равномерно перемещаются через рабочие зоны, мимо инструментов, которые совершают, как правило, лишь вращательные движения. По такой схеме построены, например, многие плоскошлифовальные и бесцентрово-шлифовальные автоматы, работающие на проход; барабанно-фрезерные станки-полуавтоматы.

Машины последовательного действия имеют различные конструктивно-компоновочные формы. Так, при малом числе позиций q в автоматах последовательного действия более рационально не линейное, а орбитальное (круговое) расположение позиций, детали устанавливаются на круглом столе с вертикальной (рис. 256, б) или горизонтальной (рис. 256, в) осью. Обработка на всех позициях, а также загрузка и съем деталей производятся во время стоянки стола, далее следует поворот, обеспечивающий необходимое транспортное перемещение детали с позиции на позицию. Цикл обработки детали соответствует полному обороту стола, закрепление и открепление детали выполняется один раз в загрузочно-разгрузочной позиции. Время рабочего цикла T равно сумме длительности стоянки стола $t_{ст}$ и его поворота $t_{пов}$: $T = t_p + t_{x,x} = t_{ст} + t_{пов}$.

Во время стоянки производятся все рабочие ходы, а также быстрые подводы и отводы инструментов, с которыми совмещены во времени загрузка и зажим, разжим и съем деталей в соответствующих холостых позициях. Поворот стола — несовмещенное время холостого хода.

По такой схеме (рис. 256, б, в) построены токарные многошпиндельные автоматы и полуавтоматы вертикального и горизонтального типа, многопозиционные агрегатные станки, многочисленные сборочные, контрольные и другие автоматы.

При большом числе позиций их круговая компоновка на столе становится нерациональной, так как большая площадь в центре стола остается неиспользованной, возникают большие силы инерции при повороте и т. д. Поэтому при $q > 6 \div 8$ применяют линейную компоновку позиций (рис. 256, г). Обработку производят в стационарных приспособлениях на рабочих позициях, детали приходится закреплять столько

раз, сколько имеется рабочих позиций. Дискретные транспортные перемещения производятся с помощью шаговых конвейеров. В прямоточных машинах непрерывного действия, которые имеют такую же структурную схему (рис. 256, г), непрерывное транспортное перемещение деталей выполняют цепными, валковыми и т. д. устройствами. Недостаток схемы — ее малая надежность, так как любой отказ механизма, инструмента, органов управления приводит к отказу всей системы. Поэтому сложные системы принято делить на участки — секции, с установкой межоперационных накопителей (рис. 256, д). Теперь при отказе, например на II участке, останавливается только он, участок I будет работать в накопитель, участок III — из накопителя. Таким образом происходит компенсация несовпадающих во времени простоев, повышение производительности и надежности систем при тех же характеристиках встроенного оборудования.

Рассмотренные конструктивно-компоновочные варианты машин последовательного действия относятся и к автоматам и к автоматическим линиям. Между ними нет резкой границы, принципы их построения, закономерности развития, методы анализа и синтеза едины и будут рассмотрены совместно. Условно принято системы с круговым расположением позиций относить к многопозиционным автоматам, с линейным — к автоматическим линиям.

Важнейшей задачей расчета и проектирования машин последовательного действия является выбор числа их позиций q , оптимальной степени дифференциации и концентрации операций, что выполняется по критериям производительности, надежности в работе, экономической эффективности. Задача может ставиться в двух аспектах: 1) для общего структурного анализа принципов и вариантов построения машин, закономерностей их развития и т. д. — для этого можно использовать адаптированные математические модели, не учитывающие границы дифференциации технологического процесса, равномерность дифференциации и т. д.; 2) для решения конкретных задач расчета и проектирования машин, сравнительного анализа вариантов и их оптимального синтеза — в этих случаях должны учи-

тываться все реальные особенности, ограничения и т. д., присущие конкретным технологическим процессам и деталям. В обоих случаях оценивают ожидаемую техническую производительность с учетом лишь длительности рабочего цикла и внецикловых потерь. Используя формулу (180), получим

$$Q_q = \frac{1}{T + \Sigma t_e} = \frac{1}{t_p + t_{x,x} + \Sigma C_i + \Sigma t_e}, \quad (206)$$

где Σt_e — собственные внецикловые потери как характеристика надежности станка; ΣC_i — внецикловые потери по инструменту; Σt_e — внецикловые потери по оборудованию.

Метод поиска зависимости $Q_q = f(q)$ состоит в том, что сначала оценивают частные зависимости $t_p = f(q)$, $t_{x,x} = f(q)$, $\Sigma t_e = f(q)$, $\Sigma C_i = f(q)$, которые затем сводят воедино в формуле (206).

Время рабочих ходов цикла t_p определяют из условий, что при любом числе позиций q машиной выполняется один и тот же объем технологических операций длительностью t_{p0} , но число позиций обработки может быть различным. При равномерной дифференциации

$$t_p = \frac{t_{p0}}{q}.$$

При неравномерной дифференциации $t_p(q) > \frac{t_{p0}}{q}$ (см. табл. 20 и рис. 250) величину $t_p(q)$ рассчитывают дискретными методами, рассмотренными выше.

Время $t_{x,x}$ холостых ходов цикла будет значительно меньше, чем у однопозиционных автоматов с дифференцированным технологическим процессом, так как наиболее длительные опера-

ции — загрузка и зажим, открепление и съем — стали совмещенными, выполняются на специальных холостых позициях и на длительность рабочего цикла не влияют. Несовмещенными холостыми ходами остаются (рис. 256) быстрый подвод и отвод инструментов и перемещение детали с позиции на позицию, которые определяются лишь динамическими характеристиками оборудования и от числа позиций q не зависят. Поэтому $t_{x,x} = \text{const}$.

Потери по оборудованию Σt_e зависят от числа позиций, так как при увеличении q растет и конструктивная сложность машин, число механизмов рабочих и холостых ходов, приводных управляющих и др. Будем считать эти потери пропорциональными числу позиций $\Sigma t_e = t_e q$, где t_e — внецикловые потери одного комплекта механизмов и устройств.

Подставляя значения t_p , $t_{x,x}$, ΣC_i и Σt_e в общую формулу (206), получим функциональную зависимость производительности машин последовательного действия от числа рабочих позиций:

$$Q_q = \frac{1}{\frac{t_{p0}}{q} + t_{x,x} + \Sigma C_i + q t_e}. \quad (207)$$

Она является функцией технологических (t_{p0}), конструктивных ($t_{x,x}$), структурных (q) параметров и показателей надежности в работе (ΣC_i и t_e). Графики этой зависимости для различной величины внецикловых потерь $t_{e1} < t_{e2} < t_{e3}$ показаны на рис. 257. Зависимость $Q_q = f(q)$ носит экстремальный характер — с увеличением числа позиций производительность автоматов сначала растет, а затем резко падает. При каждом сочетании конкретных усилий существует только одно значение числа позиций $q_{\text{опт}}$, обеспечивающее максимальную производительность машины Q_{max} . Это значение можно получить аналитически, взяв первую производную $\frac{dQ_q}{dq}$ и приравняв ее нулю.

Продифференцировав уравнение (207), получим

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{t_{p0}}{t_e}} = \sqrt{\frac{t_{p0}}{\omega_{ц\tau_b}}}. \quad (208)$$

Оптимальное число позиций машин последовательного действия зависит только от двух факторов: общей дли-

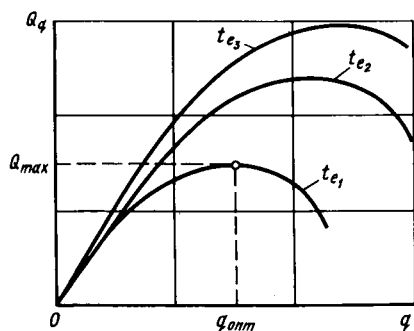


Рис. 257. Зависимость производительности автоматов последовательного действия от числа рабочих позиций и надежности механизмов и устройств

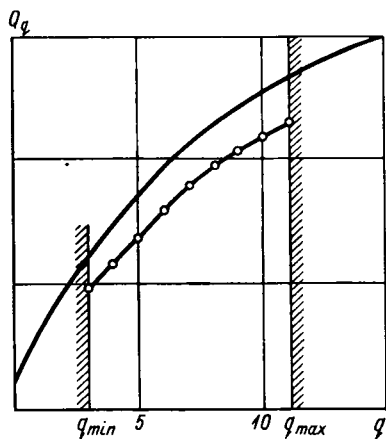


Рис. 258. Сравнение теоретической и реальной производительности автоматов последовательного действия (с учетом пределов дифференциации технологического процесса и ее неравномерности по позициям)

тельности несовмещенных операций обработки и уровня надежности механизмов и устройств, их безотказности и ремонтпригодности.

В реальных условиях при ограничениях в числе рабочих позиций ($q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$), неравномерности дифференциации технологического процесса и неизбежных организационных простоях производительность всегда будет меньше теоретической. На рис. 258 приведены графики ожидаемой производительности при изготовлении вала (см. рис. 246). Время рабочих ходов $t_p(q)$ при реальной дифференциации технологического процесса соответствует табл. 20, $t_{x.x} = 0,2$ мин, $\Sigma C_i = 0,12$ мин, $t_e = 0,02$ мин. Максимальное возможное число позиций $q_{\max} = 11$ намного ниже теоретически оптимального, рассчитываемого по формуле (208): $q_{\text{опт}} = 130$. Расчеты показывают, что в большинстве случаев производительность реально возможных вариантов построения автоматов и линий ($q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$) находится на «восходящей» ветви кривой производительности.

Изменение производительности автоматических линий последовательного действия подчиняется тем же закономерностям, что и многопозиционных автоматов (см. рис. 257 и 258). При этом изменение производительности линий из заблокированного оборудования (рис. 257, з) описывается теми же

уравнениями (207) и (208). В автоматических линиях, разделенных на участки (рис. 256, д), происходит уменьшение внецикловых потерь $\Sigma t_c = \Sigma C_i + q t_e$, которое тем больше, чем на большее число $n_y > 1$ участков разделена линия.

Ожидаемую фактическую производительность линии в пределах $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ можно выразить уравнением

$$Q_{\text{ал}} = \frac{1}{t_p(q) + t_{x.x} + \frac{\Sigma C_i + q t_e}{n_y} W} \eta_{\text{загр}}, \quad (209)$$

где $t_p(q)$ — время рабочих ходов как время наиболее длительной обработки на одной из q рабочих позиций; t_e — внецикловые потери одной позиции по оборудованию; W — коэффициент возрастания потерь из-за их неполной компенсации накопителями (только, если вместимость накопителей $E = \infty$, $W = 1,0$; во всех реальных случаях, когда $E < \infty$, $W > 1,0$); $\eta_{\text{загр}}$ — коэффициент загрузки линии, учитывающих оргтехпотери.

При сравнительном анализе и синтезе удобно производительность линии оценивать по последнему участку. В этом случае величина собственных суммарных внецикловых потерь всего скомпанованного на последнем участке оборудования

$$\Sigma t_{yч} = \frac{\Sigma C_i + q t_e}{n_y}. \quad (210)$$

Величина $W > 1,0$ показывает, во сколько раз возрастают простои последнего участка из-за некомпенсированных накопителями простоев всех предыдущих участков. Число участков в линии может изменяться в пределах $1 \leq n_y \leq q$. Линии с $n_y = 1$ называются линиями с жесткой агрегатной связью. Если в линии число участков равно числу станков ($n_y = q$), это означает, что она имеет либо гибкую межагрегатную связь (при автоматических накопителях), либо это поточная линия (при механизированных накопителях).

§ 3. Автоматы и линии параллельного действия

В машинах параллельного действия концентрируются одноименные операции дифференцированного технологического процесса, как правило, одна

основная и две-три совмещенные с ней. Поэтому в p позициях имеется p одинаковых технологических комплектов инструментов, каждая деталь проходит только через одну рабочую позицию. Не следует путать параллельность и одновременность действия. Как известно, параллельность (или «параллелизм») в работе означает, что в различных местах выполняется одна и та же работа, независимо от того, делается это одновременно или со смещением по фазе. Во многих машинах, тем более линиях параллельного действия, обработка на различных позициях производится неодновременно — это не мешает им быть системами параллельного действия.

Как и машины последовательного действия, машины параллельного действия по характеру транспортных перемещений деталей могут быть дискретного или непрерывного действия.

В дискретных машинах параллельного действия (рис. 259) обработка деталей и их транспортирование разделены во времени, комплекты инструментов действуют в стационарных рабочих зонах. Исходным вариантом является однопозиционная машина (рис. 259, а), которую можно рассматривать как частный случай машины параллельного действия с числом позиций $p=1$.

Цикл работы, идентичный для всех машин дискретного действия с любым числом p , складывается из подачи заготовки в позицию, ее закрепления, обработки и выдачи. Объединение p позиций в конструктивно единой машине параллельного действия (рис. 259, б) позволяет по сравнению с p однопозиционными машинами сократить занимаемую площадь и общую конструктивную сложность за счет объединения внепозиционных механизмов: двигателей, приводных, управляющих. Однако при этом (при одинаковой длительности рабочих, холостых ходов и рабочего цикла в целом) производительность будет ниже из-за того, что любой отказ механизма или инструмента приводит, как правило, к отказу всей системы, чего нет в группе из p независимо работающих машин. Известны машины параллельного действия с расположением позиций по окружности на неподвижном столе (рис. 259, в), чем достигается компактность, удобное расположение привода в центре машины. Цикл работы на отдельных позициях может быть смещен по фазе, что позволяет при ручной загрузке избежать потерь из-за ожидания оператора.

В автоматических линиях параллельного действия с дискретным характером работы (рис. 259, г) едиными явля-

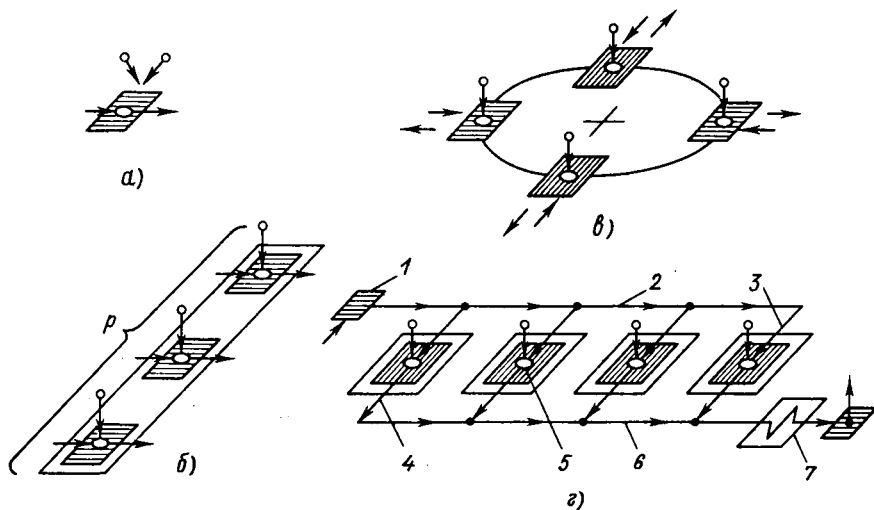


Рис. 259. Структурно-компоновочные варианты автоматов и автоматических линий параллельного (дискретного) действия

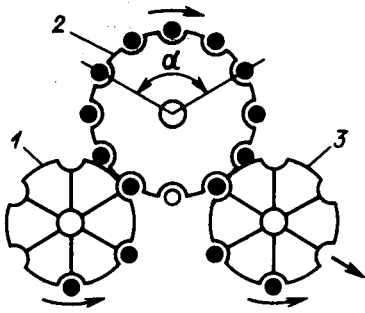


Рис. 260. Структурная схема роторной машины параллельного (непрерывного) действия:

ются не технологические машины, которые остаются однопозиционными и конструктивно независимыми, а все элементы транспортно-загрузочных систем: конвейеры-подъемники 1, конвейеры-распределители 2, подающие 3 и отводящие 4 устройства к параллельно работающим автоматам 5, отводящие конвейеры 6, магазины-накопители 7 и т. д. При этом в отличие от многопозиционных автоматов параллельного действия (рис. 259, б, в) простои отдельных позиций автоматических линий не сказываются на всех остальных.

Машины параллельного непрерывного действия конструктивно могут быть выполнены в двух основных вариантах: роторные и конвейерные. Их отличительным признаком является то, что детали получают непрерывное транспортное перемещение, совместное с инструментальными блоками, вся обработка производится на ходу, в процессе транспортного перемещения. Последнее характерно и для машин непрерывного последовательного действия (см. рис. 256, а, з), однако технологические механизмы и инструменты располагаются в стационарных рабочих зонах, обрабатываемые детали подходят по очереди ко всем инструментам, скорость транспортного перемещения является одновременно и скоростью рабочей подачи. В роторных конвейерных машинах скорости транспортных и рабочих перемещений полностью независимы.

Роторные автоматы (рис. 260) включают, как правило, три основные части: ротор загрузки 1, рабочий (техно-

логический) ротор 2, ротор выгрузки 3. Транспортировка, передача и обработка производятся при зажиме деталей в клещевых захватах. Но в таких захватах можно зажимать детали круглого или прямоугольного сечения. В клещи ротора 1 загрузки детали подаются из загрузочного устройства, которое смонтировано над ротором загрузки и вращается синхронно с ним. Передача из транспортного в рабочий ротор производится на ходу, в процессе синхронного перемещения клещей по соприкасающимся траекториям, для чего линейные скорости всех роторов должны быть одинаковыми. Все позиции рабочего ротора 2 имеют одинаковые инструментальные блоки, например для операций сверления, зенкерования, штамповки, вытяжки, контроля, сборки и т. д. При совместном транспортном перемещении инструменты подходят к детали. Технологическая обработка производится при повороте ротора на угол α , который является стационарным. Затем следует отвод инструментов, разжим деталей, передача их в ротор 3 выгрузки и выдача. Таким образом, в отличие от автоматов непрерывного последовательного действия, где технологический процесс производится также непрерывно, и все инструменты непрерывно участвуют в работе, в роторных машинах каждый инструмент используется дискретно лишь во время поворота ротора на угол α . Остальную часть оборота $\beta = 360^\circ - \alpha$ инструменты проходят в отведенном состоянии. Длительность рабочего цикла T роторных машин соответствует их одному обороту, за это время выдается p деталей. Длительность рабочих и холостых ходов цикла пропорциональна соответствующим углам поворота:

$$\frac{t_p}{t_{x.x}} = \frac{\alpha}{\beta}; \quad \frac{\alpha}{360^\circ} = \frac{t_p}{T};$$

$$T = t_p \frac{360^\circ}{\alpha} = t_p \frac{\alpha + \beta}{\alpha}. \quad (211)$$

Конвейерные машины (рис. 261) применяют при большом числе позиций p , когда роторная (орбитальная) их компоновка становится нерациональной. Их применяют при длительных операциях обработки сложных деталей. Конвейерные машины представляют собой полуавтоматы с ручной загрузкой и съемом детали. Длительность рабочего

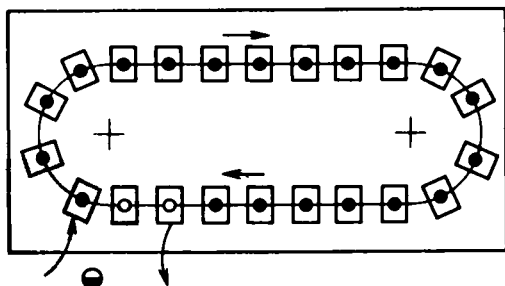


Рис. 261. Структурная схема конвейерной машины параллельного действия

цикла T соответствует времени полного оборота одной позиции на непрерывно движущемся конвейере. Время рабочих и холостых ходов цикла пропорционально длине соответствующих зон.

Изменение производительности машин параллельного действия, как дискретного, так и непрерывного, подчиняется единым закономерностям. Зависимость производительности Q_p от числа позиций p определяется теми же факторами и имеет идентичный характер. За время рабочего цикла T выдается p изделий, следовательно, цикловая производительность

$$Q_{ц} = \frac{p}{T} = \frac{p}{t_p + t_{x,x}} = \frac{p}{t_p \frac{\alpha + \beta}{\alpha}} = \frac{p}{t_p} \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = \frac{p\alpha}{t_p 360^\circ}. \quad (212)$$

Как было сказано, для машин непрерывного действия (роторных) α и β означают углы рабочих и холостых зон вращения ротора, для машин дискретного действия — соответствующие углы поворота распределительного вала.

В каждой машине находятся p комплектов одинаковых механизмов и инструментов, которые имеют собственные внецикловые потери по инструменту и оборудованию: $\Sigma C_i + t_e$, если при каждом отказе останавливается вся машина, собственные внецикловые потери

$$\Sigma t_e = p(\Sigma C_i + t_e). \quad (213)$$

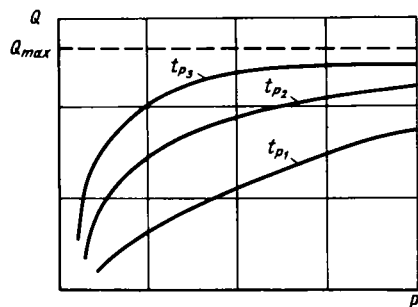


Рис. 262. Зависимость производительности автоматов параллельного действия от числа позиций

Следовательно, техническая производительность машин параллельного действия

$$Q_p = \frac{p}{T + \Sigma t_e} = \frac{p}{t_p + t_{x,x} + p(\Sigma C_i + t_e)} = \frac{p}{t_p \frac{\alpha + \beta}{\alpha} + p(\Sigma C_i + t_e)}. \quad (214)$$

На рис. 262 приведены построенные по формуле (214) графики зависимости производительности автоматов параллельного действия, в том числе и роторных машин, от числа позиций p и длительности обработки ($t_{p3} < t_{p2} < t_{p1}$). Как видно, в отличие от автоматов последовательного действия, где такая зависимость имеет экстремальный характер (см. рис. 257), производительность автоматов параллельного действия имеет монотонный возрастающий характер — чем больше число позиций, тем выше производительность. Однако эта зависимость не пропорциональная, а асимптотическая — производительность стремится к некоторому пределу $Q_{\max}$, который определяется только надежностью в работе механизмов и инструмента:

$$Q_{\max} = \lim_{p \rightarrow \infty} Q_p = \frac{1}{\Sigma C_i + t_e}. \quad (215)$$

Следует отметить, что многие реальные конструкции машин параллельного действия, в том числе роторные и конвейерные, обладают свойством «живучести»: при отказе механизма или инструмента в какой-либо позиции вся машина не останавливается, а лишь отключается от питания заготовками

отказавшая позиция. В результате машина выключается, если число отказов позиций $> 1, 2, 3, 4$ — что позволяет повысить производительность до 10—15%.

В автоматических линиях параллельного действия все встроенные однопозиционные автоматы (см. рис. 260, *г*) работают независимо. Производительность каждого из них

$$Q_1 = \frac{1}{t_p + t_{x.x} + \Sigma C_i + t_e}. \quad (216)$$

Пренебрегая потерями общей транспортной системы, получим

$$Q_{ал} = Q_1 p = \frac{p}{t_p + t_{x.x} + \Sigma C_i + t_e}. \quad (217)$$

Зависимость производительности автоматических линий параллельного действия от числа встроенных однопозиционных автоматов имеет прямо пропорциональный характер.

Автоматы и линии параллельного действия получают все большее распространение в машиностроении. Роторные машины используют для выполнения кратковременных операций (штамповка, вытяжка, снятие фасок, сборка и др.). Линии параллельного действия применяются, например, в подшипниковой промышленности для операций шлифования, полирования и т. д.

§ 4. Машины и линии последовательно-параллельного действия

Машины последовательно-параллельного действия являются наиболее сложными многопозиционными системами как в структурном, так и в конструктивном отношении. В них концентрируются как одноименные, так и разноименные операции. Их конструктивным отличием является наличие нескольких ($p \geq 2$) параллельных потоков обработки, в каждом из которых деталь последовательно проходит через q рабочих позиций.

Автоматы последовательно-параллельного действия (см. рис. 263) могут иметь линейное или круговое расположение позиций. Линейная компоновка (рис. 263, *а*) не получила широкого рас-

пространения из-за конструктивной сложности и трудности наладки. При компоновке позиций по окружности на столе с периодическим поворотом (рис. 263, *б*) все позиционные механизмы и устройства полностью дублированы. Так, при $p=2$ автомат должен иметь два одинаковых автооператора для автоматической загрузки и съема деталей, два одинаковых суппорта с инструментами и т. д. Поворот стола (шпиндельного блока) производится сразу на две позиции.

Все более широкое распространение в условиях массового производства получают автоматические линии последовательно-параллельного действия, двух основных модификаций: 1) линии из автоматов дискретного последовательного действия, работающих параллельно (рис. 264, *а*), такие линии применяются в автомобильной, тракторной, подшипниковой промышленности; 2) линии из автоматов параллельного действия, работающих последовательно (роторные и роторно-конвейерные линии, рис. 264, *б*); их применяют для производства мелких деталей типа колпачков и др.

Машины последовательно-параллельного действия сочетают в себе свойства двух предыдущих групп. Время рабочих ходов цикла определяется общим объемом обработки t_{p0} и степенью его дифференциации — числом последовательных позиций q . Время холостых ходов $t_{x.x}$ от числа позиций не зависит, за цикл выдается p деталей. Цикловая производительность

$$Q_u = \frac{p}{T} = \frac{p}{\frac{t_{p0}}{q} + t_{x.x}} = \frac{p}{\frac{t_{p0}}{q} \frac{360^\circ}{\alpha}}. \quad (218)$$

Собственные внецикловые потери Σt_e при жесткой блокировке всех позиций (рис. 263, *а, б* и рис. 264, *б*) будут равны сумме всех потерь позиций и потоков. Внецикловые потери одного потока, где имеется один комплект инструмента и p комплектов механизмов, будут $\Sigma C_i + q t_e$; внецикловые потери всей машины при p потоках

$$\Sigma t_e = p (\Sigma C_i + q t_e). \quad (219)$$

Фактическая производительность машин последовательно-параллельного действия

$$Q_{pq} = \frac{p}{T + \sum t_c} = \frac{p}{\frac{t_{p0}}{q} + t_{x,x} + p(\sum C_i + qt_c)} \quad (220)$$

На рис. 265 приведены графики зависимости Q_{pq} от числа последовательных позиций q и потоков обработки p . Изменение производительности (как и для машин последовательного действия) имеет экстремальный характер — с увеличением числа последовательных позиций она сначала растет, а потом резко падает. При любом сочетании определяющих факторов существует единст-

венное значение числа позиций $q_{\text{опт}}$, при котором производительность машины максимальна. При этом положение оптимума числа последовательных позиций зависит от числа потоков обработки, при увеличении p величина $q_{\text{опт}}$ уменьшается. Чем больше число потоков обработки, тем выше производительность, следовательно, возрастает «цена» неоптимальных решений.

Кривая $p=1$ (см. рис. 265) — график производительности машин последовательного действия, что иллюстрирует тезис о машинах последовательно-параллельного действия как наиболее общем случае многопозиционных машин. Действительно, подставив в формулу (220) значения $p=1$, $q>1$ (однопоточная машина), получим формулу

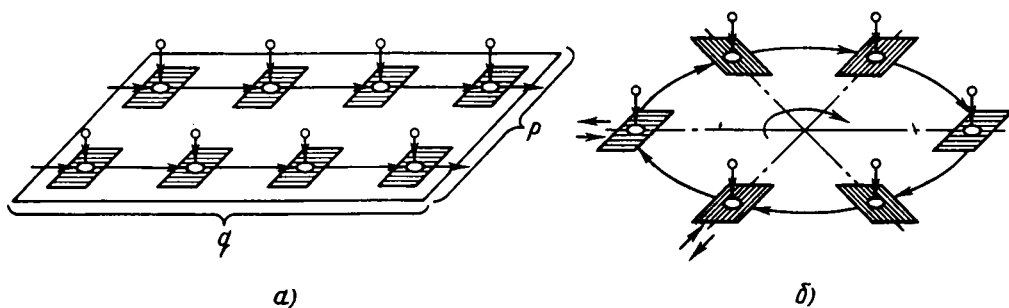


Рис. 263. Структурно-компоновочные варианты автоматов последовательно-параллельного действия: а с линейным расположением позиций; б с расположением позиций по окружности

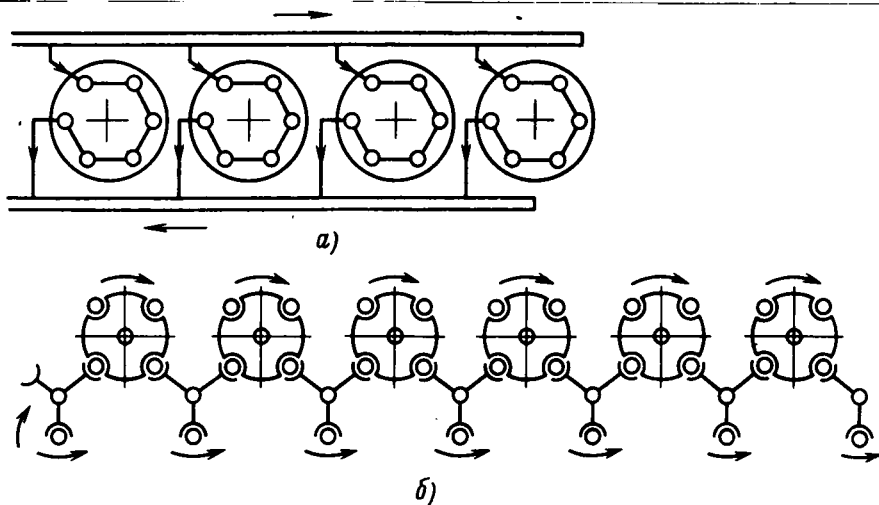


Рис. 264. Структурно-компоновочные варианты автоматических линий последовательно-параллельного действия:

а линия из автоматов с последовательным движением; б децентрализованная линия

(207) — производительность машин последовательного действия. Подставив в ту же формулу (220) значение $p > 1$, $q = 1$ (многопоточная машина), получим формулу (214) — производительность машин параллельного действия.

Оптимальное, наивыгоднейшее по критерию производительности число позиций $q_{\text{опт}}$ можно определить, взяв производную $\frac{dQ_{pq}}{dq}$ в уравнении (22) и приравняв ее нулю. В результате получим

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{t_{p0}}{p t_e}} = \sqrt{\frac{t_{p0}}{p \omega_{ц} \tau_{в}}} \quad (221)$$

Подставив в эту формулу значение $p = 1$, получим ранее выведенную формулу для оптимального числа позиций автоматов последовательного действия (208).

Производительность автоматических линий последовательно-параллельного действия с жесткой межагрегатной связью (см. рис. 264, б) описывается тем же уравнением (220), как и для многопозиционных машин. В автоматических линиях из многопозиционных автоматов последовательного действия, работающих параллельно (см. рис. 265, а), простои автоматов друг на друга не влияют, производительность пропорциональна количеству встроенного оборудования. Пренебрегая потерями из-за отказов транспортных систем, получим

$$Q_{ал} = p Q_q = \frac{p}{\frac{t_{p0}}{q} + t_{x,x} + \Sigma C_i + q t_e} \quad (222)$$

Автоматические линии обоих типов (см. рис. 264) являются конкурентными, потому что могут иметь одинаковое число позиций и потоков; так, на рис. 264 обе линии имеют характеристики $q = 6$, $p = 4$ (технологический процесс дифференцирован на шесть частей, обработка производится в четыре потока). Область применения обоих вариантов определяется объемом обработки t_{p0} и надежностью в работе механизмов и устройств.

Пример. Сравним оба типа автоматических линий (рис. 264) по цикловой производительности при обработке двух видов деталей, с общей длительностью обработки: 1) $t_{p0} = 6$ мин (что соответствует, например, токарной обработке колес

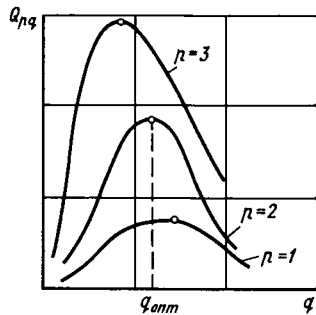


Рис. 265. Зависимость производительности машин последовательно-параллельного действия от числа позиций и потоков обработки

подшипников; 2) $t_{p0} = 6$ с (что соответствует условиям обработки давлением деталей типа колпачков). Конструктивными константами машин обоих типов, встроенных в линии, независимых от условий обработки, являются:

а) для линий из автоматов последовательного действия (см. рис. 264, а) — время поворота шпиндельного блока как несомещенное время рабочего хода $t_{x,x} = 3$ с;

б) для роторных автоматических линий (см. рис. 264, б) — угол холостого поворота позиции ротора, когда инструмент отведен и обработка не происходит, $\beta = 180^\circ$ (следовательно, и $\alpha = 360^\circ - \beta = 180^\circ$).

Цикловую производительность для обоих вариантов можно определить по формуле (218).

Структурные характеристики обеих линий одинаковы и соответствуют рис. 264 ($q = 6$, $p = 4$).

При обработке сложных деталей ($t_{p0} = 6$ мин = 360 с) цикловая производительность линии из автоматов последовательного действия

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{p}{\frac{t_{p0}}{q} + t_{x,x}} = \\ &= \frac{4 \cdot 60}{\frac{360}{6} + 3} \approx 3,8 \text{ шт/мин}, \end{aligned}$$

а цикловая производительность роторной автоматической линии

$$Q_2 = \frac{p}{\frac{t_{p0}}{q} \frac{360^\circ}{\alpha}} = \frac{4 \cdot 60}{\frac{360}{6} \frac{360^\circ}{180^\circ}} = 2 \text{ шт/мин}.$$

Первый вариант линии оказался почти вдвое более производительным, потому что в автоматах последовательного действия интервал времени между двумя срабатываниями инструментов равен лишь 3 с (время поворота блока), а в роторных машинах — 60 с (время 1/2 оборота ротора):

При обработке простых деталей ($t_{p0} = 6$ с) цикловая производительность линии из автоматов последовательного действия

$$Q_1 = \frac{p}{\frac{t_{p0}}{q} + t_{x,x}} = \frac{4 \cdot 60}{\frac{6}{6} + 3} = 60 \text{ шт/мин},$$

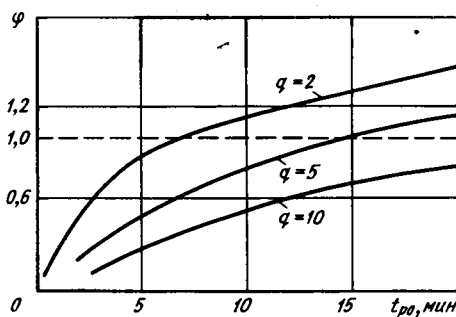


Рис. 266. Сравнительная производительность автоматических линий последовательно-параллельного действия различных типов

а цикловая производительность роторной линии

$$Q_2 = \frac{p}{t_{p0} \frac{360^\circ}{q} \alpha} = \frac{4 \cdot 60}{6 \frac{360}{6} \alpha} = 120 \text{ шт/мин};$$

$$\varphi = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{60}{120} = 0,5.$$

Теперь роторная линия при обработке одинаковых деталей производительнее в 2 раза. Ротор делает 1/2 оборота ($\alpha = 180^\circ$) за $t_p = \frac{t_{p0}}{q} = 1$ с, следовательно, и вторую половину — за то же время, длительность рабочего цикла — 2 с, что не является пределом благодаря непрерывному вращению и отсутствию сил инерции. В автоматах последовательного действия обработка во время стоянки шпиндельного блока длится $t_p = 1$ с, но его поворот под действием сил инерции не может быть выполнен также быстро, время цикла $T = 4$ с.

Графики зависимости коэффициента роста производительности φ линий из автоматов последовательного действия по сравнению с роторными линиями приведены на рис. 266:

$$\varphi = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{t_{p0} \frac{360^\circ}{q} \alpha}{t_{p0} + t_{x.x}}. \quad (223)$$

При малой длительности обработки, соответствующей операции обработки давлением, линии из автоматов дискретного действия значительно уступают роторным ($\varphi < 1$), при большой длительности, характерной для обработки резанием, — наоборот ($\varphi > 1$).

Глава 31 Основные этапы проектирования автоматов и автоматических линий

§ 1. Специфика проектно-конструкторских задач при автоматизации массового и серийного производств

Техническая подготовка производства — это совокупность работ по внедрению новых и совершенствованию действующих конструкций изделий и технологических процессов их изготовления, ее разделяют на конструкторскую и технологическую. Конструкторская подготовка включает в себя работы по созданию объектов производства, их отладке и внедрению. Технологическая подготовка включает весь комплекс работ по созданию технологических процессов обработки, контроля, сборки и соответствующего технологического оборудования с той или иной степенью автоматизации. Научно-методические основы этих работ регламентируются Единой системой технологической подготовки производства (ЕСТПП).

Существуют принципиальные различия в реализации технологической

подготовки неавтоматизированного и автоматизированного (прежде всего массового) производства. Технологические процессы неавтоматизированного производства выполняют обычно на стандартном универсальном оборудовании. Технологическая подготовка производства заключается главным образом в том, чтобы разработать маршруты и выбрать режимы обработки применительно именно к известным техническим характеристикам стандартного оборудования, возможностям станков и людей, которые их обслуживают. Поэтому для неавтоматизированного производства универсальное оборудование первично, а технологические процессы — вторичны.

В автоматизированном производстве, особенно массовом и крупносерийном, используют специальное технологическое оборудование, спроектированное для обработки конкретных деталей. При создании специального оборудования разрабатывают сначала технологические процессы (методы, маршруты, режимы обработки), лишь затем

материализуют эту технологию, проектируя автоматы и автоматические линии. Таким образом, для условий автоматизированного производства технология первична, а технологическое оборудование вторично, технологический процесс есть основа автоматизации, что неоднократно подчеркивал проф. Г. А. Шаумян. Автоматизация серийного производства выполняется в настоящее время главным образом на базе станков-полуавтоматов и автоматов с ЧПУ, однако и здесь все большее применение находят специализированные конструкции, особенно при создании автоматизированных технологических комплексов с управлением от ЭВМ.

В техническом задании на проектирование автоматизированного технологического оборудования содержатся следующие исходные данные: чертежи заготовок и готовых изделий с техническими условиями — требования качества; производственная программа выпуска с указанием сменности работы оборудования — требования количества; дополнительные данные, облегчающие проектирование. Первым этапом проектирования является этап технического предложения, когда разрабатывается технологический процесс и решаются все вопросы выбора принципиального варианта машины или системы машин как основы всего последующего процесса конструирования. Далее следует конструктивная разработка механизмов, устройств, компонентов машин и планировок их систем с разработкой соответствующих механических, гидравлических и электрических схем, привода и управления. После изготовления и сборки всех конструкций в металле, их наладки и опробования наступает ответственный этап приемо-сдаточных испытаний в следующей последовательности: испытания отдельных механизмов на холостом ходу для оценки правильности сборки; испытания машин на холостом ходу и под нагрузкой с обработкой деталей пробной партии на заводе-изготовителе; испытания на заводе-заказчике в реальных производственных условиях, при загрузке в масштабах производственной программы выпуска, с оформлением акта внедрения. Далее следует промышленное освоение и ста-

бильная эксплуатация. Исследования работоспособности, которые проводят на данном этапе, решают задачу реализации «обратной связи» от эксплуатации на последующее проектирование.

§ 2. Вариантность технических решений на ранних стадиях проектирования

Важнейшим этапом проектирования автоматов и автоматических линий является этап технического предложения, на котором формируются все основные технологические и структурные решения, выбирается степень автоматизации проектируемого оборудования, закладываются основы получения экономического эффекта автоматизации, который будет реализован лишь много позже — на этапе производственной эксплуатации. Именно на этапе технического предложения определяется потенциал будущего технического и экономического эффекта внедрения новой техники. Все последующие этапы (конструктивная разработка механизмов и устройств и их эксплуатация) лишь реализуют в той или иной степени этот потенциал.

Основная трудность получения максимально возможного экономического эффекта автоматизации заключается в многовариантности технологических и структурных решений на ранних стадиях проектирования, в сложности процесса формирования вариантов, их сравнительного анализа и выбора оптимальных решений. При технологической подготовке неавтоматизированного серийного и индивидуального производства, которые реализуются на стандартном оборудовании, — вариантность технических решений, как правило, весьма невелика. Так, ступенчатый вал (см. рис. 246) может быть полностью обработан на универсальном токарном станке, который обслуживает один рабочий. Методы обработки определяются возможностями станка; маршрут и режимы обработки рабочего может изменять.

Покажем, что переход к условиям автоматизированного производства неизбежно приводит к росту вариантности возможных проектных решений. Рассмотрим вариационные признаки и число возможных вариантов применительно к обработке валов.

1. Методы обработки. При выборе методов обработки вариантность невелика, конкурентными являются лишь обычная продольная обточка и обточка вращающимися резцовыми головками, с их продольной подачей (два варианта).

2. Маршрут обработки. При выбранных методах маршрут обработки может быть реализован по двум основным вариантам: 1) сначала черновая, затем чистовая обработка всех шеек; 2) сначала черновая и чистовая обработка шеек $a, б, в$ (см. рис. 246), затем обработка шеек $г, д, е$.

3. Режимы обработки. Анализ показывает, что на действующих автоматах и линиях скорости резания варьируются в пределах ($v_i = 50 \div 110$ м/мин), в которых может быть обеспечена заданная точность. Выбор v_i является экстремальной задачей. Указанный диапазон режимов можно разделить, например, на три интервала: а) $v_i = 50 \div 70$ м/мин; б) $v_i = 70 \div 90$ м/мин; в) $v_i = 90 \div 110$ м/мин, протяженность которых чувствительна к показателям производительности и экономической эффективности. Следовательно, в зависимости от изменения v_i имеем три варианта технических решений.

4. Тип технологического оборудования. Обработка валов в условиях поточного автоматизированного производства может производиться на универсальных станках с ручным управлением; одношпиндельных многорезцовых полуавтоматах, одношпиндельных токарных гидрокопировальных полуавтоматах, вертикальных многошпиндельных полуавтоматах и автоматах последовательного действия; горизонтальных многошпиндельных полуавтоматах и автоматах последовательного действия; вертикальных многошпиндельных полуавтоматах и автоматах параллельного непрерывного действия. Итого шесть вариантов.

5. Степень автоматизации системы. В зависимости от степени автоматизации вспомогательных процессов загрузки и транспортировки деталей система машин для обработки ступенчатых валов может быть построена по следующим вариантам: поточная линия из универсальных станков; поточная линия из полуавтоматов; поточная линия из автоматов; автоматическая линия. Всего четыре варианта.

6. Степень дифференциации технологического процесса. Это число рабочих позиций q , на которое распределяется общий объем обработки. Согласно расчетам, выполненным в гл. 29 (см. табл. 20 и рис. 250), минимальное число позиций, на которое можно дифференцировать процесс обработки вала (см. рис. 246), равно четырем, максимальное — одиннадцати ($4 \leq q \leq 11$), следовательно, по числу рабочих позиций возможны восемь вариантов построения системы машин.

7. Число параллельных потоков обработки p . Оно зависит от требуемого уровня производительности. Для большинства машиностроительных предприятий достаточно иметь один — два потока обработки (или независимых линий), итого два варианта.

8. Число станков-дублеров. Как было показано выше (см. гл. 29), реальные процессы не поддаются равномерному дифференцированию, поэтому при классическом однопоточном варианте линии, где число станков равно числу

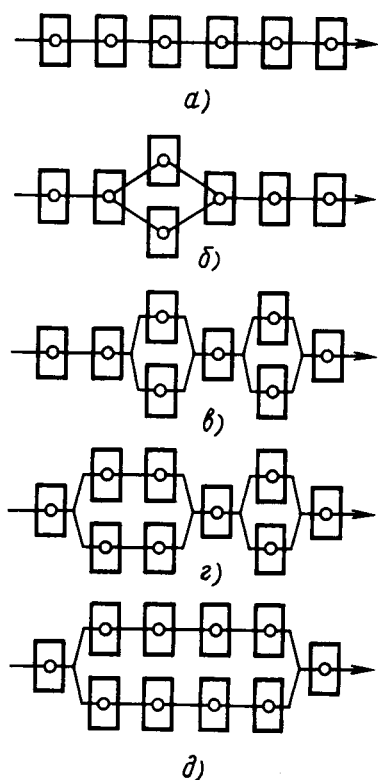


Рис. 267. Схемы вариантов однопоточной автоматической линии с различным числом встроженных станков-дублеров:

а — $m=0$; б — $m=1$; в — $m=2$; г — $m=3$; д — $m=4$.

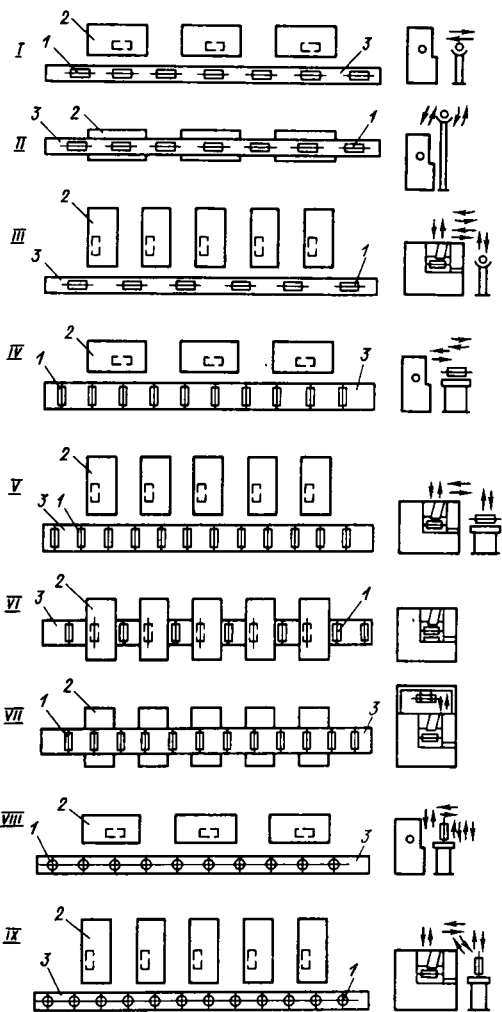


Рис. 268. Варианты (I—IX) компоновки транспортно-загрузочных систем автоматических линий обработки ступенчатых валов:

1 — детали; 2 — станки; 3 — конвейеры

рабочих позиций q (см. рис. 249), станки будут всегда иметь различную длительность цикла. Вместо того, чтобы дифференцировать обработку на лимитирующих операциях, можно использовать на них станки-дублиеры числом $1 \leq m < q$ (при $m = q$ получается двухпоточная линия). Здесь также существует широкая вариантность (рис. 267). По каждому варианту линии можно считать целесообразным использование 3—8 станков-дублиеров. Будем считать возможными шесть вариантов.

9. Тип транспортной системы. Этот вариационный признак определяется

взаимным расположением технологического и вспомогательного оборудования, траекторией перемещения обрабатываемых деталей в пределах линии. Известны девять основных вариантов (I—IX, рис. 268), в том числе: системы IV сквозного транспортирования, системы I бокового транспортирования с расположением оборудования вдоль основного конвейера, системы III бокового транспортирования с расположением оборудования поперек основного конвейера и т. д. Все эти девять вариантов являются конкурентными, так как отличаются показателями стоимости, несовмещенных холостых ходов и т. д.

10. Число участков-секций. Каждый вариант системы машин, отличающийся числом позиций, типом транспортной системы и т. д., может быть построен по различным структурным вариантам от линии с жесткой межагрегатной связью ($n_y = 1$) до линии с гибкой связью ($n_y = q$). Так, линия из шести станков ($q = 6$) может быть разделена по четырем вариантам: $n_y = 1, 2, 3, 6$ (см. рис. 269).

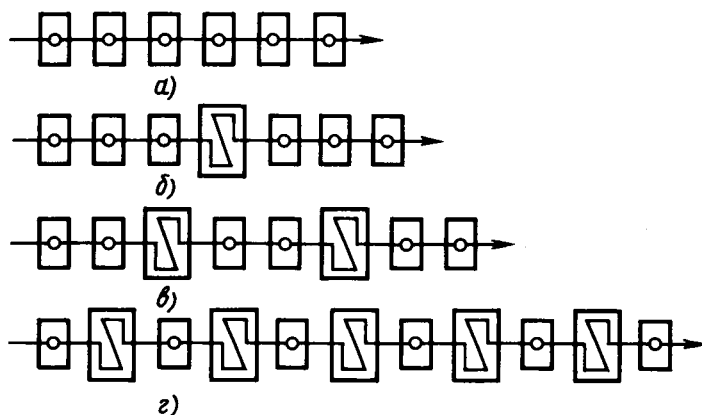
11. Тип межоперационных накопителей. Для линий обработки валов применяются магазины-накопители двух основных вариантов: сквозные, через которые проходит весь поток обрабатываемых деталей (рис. 270, а); тупиковые, которые работают только в случае отказа одного из участков (рис. 270, б). Последние более надежны в работе, однако конструктивно сложнее и занимают дополнительную площадь.

12. Число рабочих-наладчиков при обслуживании машин. Этот вариационный признак также носит ярко выраженный экстремальный характер. В предельном случае, когда один наладчик обслуживает всю линию, норма обслуживания равна числу станков ($z_n = q$), фонд зарплаты минимален, однако велики простои станков из-за ожидания очереди на обслуживание. В другом предельном случае, когда наладчик обслуживает лишь один встроенный в линию станок ($z_n = 1$), производительность линии максимальна, но велик и фонд зарплаты. Оптимальные варианты обслуживания не самоочевидны. Возможны четыре — пять вариантов.

Существуют и иные вариационные признаки, не выходящие за пределы

Рис. 269. Схемы однопоточной автоматической линии с различным числом участков-секций ($1 \leq n_y \leq 6$):

а — $n_y = 1$; б — $n_y = 2$; в — $n_y = 3$; г — $n_y = 6$



структурно-компоновочных решений, предшествующих конструктивной разработке. В их числе, например, тип загрузочных устройств, емкость накопителей и т. д.

Если обобщить указанные выше вариационные признаки и число вариантов по каждому признаку, то при условии полной совместимости вариантов их полное число по всем 12 признакам составит (для обработки вала по рис. 246) более миллиона.

Даже если учесть, что многие варианты являются несовместимыми, общее число структурно-компоновочных вариантов, которые являются конкурентными на ранних стадиях проектирования автоматических систем машин, очень велико. Следует отметить, что в линиях для обработки подшипниковых колец основным вариационным показателем является число параллельно работающих станков, в линиях для обработки корпусных изделий — число участков-секций и т. д. Важнейшим залогом высокой эффективности

автоматизации является умение конструктора видеть всю совокупность возможных вариантов, правильно их анализировать, выбирать оптимальные решения.

§ 3. Формирование общей совокупности вариантов построения систем машин

Согласно общей теории оптимального проектирования сложных систем машин оптимальным вариантом является такой, который удовлетворяет всем граничным условиям и при этом обладает экстремальным (минимальным или максимальным) значением целевой функции. Применительно к проектированию автоматов и автоматических линий такими граничными условиями являются требования качества обрабатываемых деталей и производительности, а целевой функцией — ожидаемые показатели экономической эффективности автоматизации. Основными стадиями процесса оптимизации являются формирование общей совокупности возможных, технически реализуемых вариантов; сравнительный анализ и отбор вариантов вплоть до выбора оптимального, который обеспечивал бы заданную точность обрабатываемых деталей, производственную программу выпуска и при этом обладал бы максимальными показателями экономической эффективности. Обе эти стадии равнозначны, ибо сам по себе процесс формирования совокупности возможных технических решений уже дает проектанту основу оптимального проектирования, позволяет избегать гру-

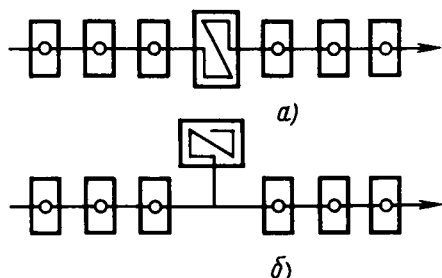


Рис. 270. Структурные схемы автоматической линии, разделенной на участки, с накопителем сквозного (а) и тупикового (б) типа

бых ошибок, когда наиболее перспективные варианты могут оказаться вообще вне поля зрения. Что касается дальнейшего анализа и отбора, то его можно производить как по качественным критериям, на основе опыта и интуиции (методами экспертных оценок), так и различными количественными, специально разработанными методами.

На первой стадии оптимизации из бесконечного множества формально возможных решений выделяют лишь те, которые являются, с одной стороны, технически возможными, реализуемыми, с другой — инженерно разумными, которые не отвергаются опытом и интуицией конструктора. Поэтому общая совокупность вариантов всегда меньше теоретической.

Основными этапами формирования общей совокупности технически возможных вариантов построения автоматизированных и автоматических систем машин является выделение вариационных признаков; определение границ варьирования по каждому из признаков и числа частных вариантов; комбинаторное сочетание вариантов по различным признакам, оценка общего числа вариантов.

Перечень вариационных параметров систем машин для обработки ступенчатых валов, рассмотренный в гл. 31, § 1, является наиболее общим, теоретическим (он может быть и продолжен). Однако в конкретном случае его необходимо составлять и анализировать, имея в виду деление всех характеризующих систему машин параметров (технологических, структурных, компоновочных, конструктивных, эксплуатационных и т. д.) на три категории:

1) параметры, которые в данном случае не являются вариационными, так как их значения заданы, или могут быть однозначно выбраны на основе накопленного опыта проектирования и эксплуатации;

2) основные вариационные параметры, по которым решения должны быть приняты однозначно еще на ранних стадиях проектирования и дальнейшей корректировке не подлежат; именно их сочетание определяет впоследствии принятый в качестве оптимального вариант линии — ее технологическую и структурную схему, пла-

нировку (число станков, участков, потоков обработки и т. д.);

3) вспомогательные вариационные параметры, которые в меньшей степени влияют на технико-экономические результаты внедрения линии, первоначально принятые решения могут впоследствии, в том числе при эксплуатации, корректироваться; такие параметры определяют обычно форму реализации принятой принципиальной схемы системы машин (режимы обработки, число наладчиков, система замены инструмента, организация ремонта и обслуживания и др.).

Предположим, необходимо спроектировать для условий массового производства автоматизированную систему машин для обработки ступенчатого вала (см. рис. 246). Заданные точностные требования (обработка под шлифование) делают необходимым двукратную обработку всех шеек, заданная производственная программа выпуска $Q_{\text{тр}} = 500$ шт/смену с возможным превышением не более чем на 15%, т. е. $500 \leq Q_{\text{тр}} \leq 575$. Все необходимые размеры, технические требования и т. д. заданы чертежом. На первой стадии оптимизации необходимо выделить реальные вариационные параметры и разделить их на основные и вспомогательные, что можно выполнить, используя данные, приведенные в гл. 31, § 2.

Накоплен значительный опыт автоматизации производства ступенчатых валов и разработаны типовые технологические методы и маршруты их обработки.

Такой типовой технологический процесс, приведенный на рис. 271, предусматривает обработку каждой детали: фрезерование и зацентровку торцов (I), черновую и чистовую продольную обточку наружных поверхностей (II—V), прорезку канавок и снятие фасок (VI). Основным встраиваемым в линию технологическим оборудованием являются фрезерно-центровальные и гидрокопировальные станки. Таким образом, методы и маршрут обработки, тип технологического оборудования из числа вариационных признаков «выпадают», т. е. число вариантов по данным признакам равно единице. Режимы обработки остаются в числе вариационных признаков будущей системы. Степень дифференциации технологического

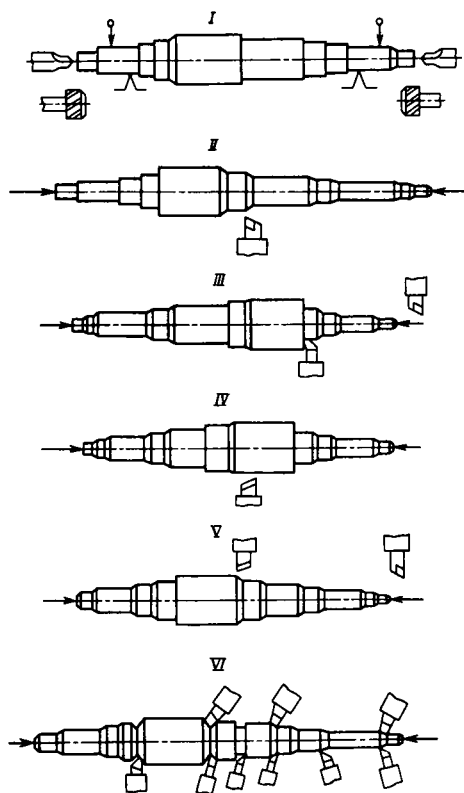


Рис. 271. Типовой технологический маршрут токарной обработки ступенчатых валов (I—VII номера рабочих позиций)

процесса, число параллельных потоков обработки, тип транспортной системы, число участков-секций, нормы обслуживания наладчиков, являются важнейшими вариационными признаками. Тип межоперационных накопителей целесообразно связывать с вариантностью транспортной системы и в качестве отдельного признака не рассматривать. В числе вариационных признаков необходимо сохранить число станков-дублеров и емкость накопителей.

Таким образом, в качестве основных вариационных параметров, которые определяют структурно-компоновочные варианты построения будущей линии, следует рассматривать число q рабочих позиций, на которое дифференцируется общий объем обработки; число p параллельных потоков обработки, в данном случае — независимых или зависимых линий; число m станков-дублеров на лимитирующих участках линии; число n_y участков-секций, на которое разделена линия;

тип транспортной системы (сквозное, боковое, верхнее и т. д. транспортирование).

В качестве вспомогательных вариационных параметров, которые определяют характер реализации структурно-компоновочных вариантов следует рассматривать режимы обработки на всех позициях — скорости резания v_i и рабочие подачи s_i ; вместимость накопителей E ; нормы обслуживания z_n .

Совокупность вариантов формируется лишь по основным вариационным признакам (параметрам), и для каждого из рассчитываемых вариантов может быть найдена оптимальная реализация.

Нетрудно видеть, что каждый из основных признаков по характеру влияния на технико-экономические параметры является конфликтным. Так, увеличение числа позиций, участков, потоков, станков-дублеров приводит к росту не только производительности, но и стоимости, занимаемой площади и т. д. при этом функциональные зависимости имеют, как правило, нелинейный характер (см., например, рис. 258, 262 и др.). При этом большинство параметров не может быть выбрано изолированно, независимо друг от друга, например число позиций q и число участков n_y .

Следующим, вторым этапом является оценка границ варьирования каждого параметра и числа частных вариантов по этому параметру. Пределы изменения числа позиций q (степени дифференцирования и концентрации операций) определяются характеристиками оборудования и технологических процессов. Минимальное число позиций $q_{\min}$ определяется возможностями автоматизированного оборудования, максимальное $q_{\max}$ — невозможностью дальнейшей дифференциации из-за потери качества. Для вала, показанного на рис. 246, согласно расчетам, выполненным в гл. 29, § 1, вариация числа позиций $q_{\min}=4$, $q_{\max}=11$. $4 \leq q \leq 11$, т. е. линия может быть построена по восьми вариантам.

Число потоков формально не имеет границ варьирования ($p=1, 2, 3, \dots$), но реально достаточно будет рассмотреть лишь одно- и двухпоточные системы ($p=1 \div 2$), т. е. два варианта. В этом случае число параллельных станков-дублеров для каждого из

однопоточных вариантов будет ограничено значениями $m=0$ (это классическая однопоточная линия, где число станков равно числу позиций) и $m=q$ (это уже двухпоточная линия). Следовательно, в качестве промежуточных необходимо рассматривать все варианты с характеристиками $1 \leq m \leq q-1$, поэтому каждому значению q соответствует теоретически еще $q-2$ варианта линий с ветвящимися потоками обработки (со станками-дублерами).

Реально, однако, такие операции, как фрезерование, зацентровка торцов, прорезка канавок и снятие фасок являются кратковременными и лимитирующими быть не могут (см. рис. 246, 247). Поэтому дублирование станков целесообразно лишь на операциях чистовой и черновой обточки, число вариантов со станками-дублерами определяется тем, на сколько частей при данном числе рабочих позиций q дифференцирована обработка при длительности $t'_{р0} > 0,30$ мин. Тогда согласно табл. 20 имеем количество вариантов однопоточной линии при каждом значении q .

$q \dots$	4	5	6	7	8	9	10	11
$m \dots$	0-3	0-4	0-5	0-4	0-3	0-2	0-1	0
Число вариантов линии	4	5	6	5	4	3	2	1

Число участков-секций линии также зависит от числа рабочих позиций. Формально $n_y=1, 2, \dots, q$, т. е. число структурных вариантов равно числу

Таблица 21
Структурно-компоновочные варианты автоматической линии

Число позиций	Число вариантов		
	по числу участков n_y	по числу дублеров m	всего при данном q
4	3	4	96
5	3	5	120
6	4	6	192
7	4	5	160
8	5	4	160
9	5	3	120
10	5	2	80
11	6	1	48

Итого $S = 976$

Примечание. По типу транспортной системы для любого числа позиций q существуют восемь вариантов автоматической линии.

позиций ($1 \leq n_y \leq q$), однако реально многие варианты деления линий на участки не применяются, например $n_y > q/2$ (кроме $n_y=q$) и т. д.

В зависимости от типа транспортной системы для любого числа станков, участков и т. д. существуют восемь типов транспортных систем. Все они применимы для однопоточных линий, но не все — для линий с ветвящимися потоками обработки ($m > 0$).

Все полученные частные значения сведены в табл. 21, откуда можно получить общую совокупность возможных вариантов построения однопоточных линий для обработки ступенчатых валов.

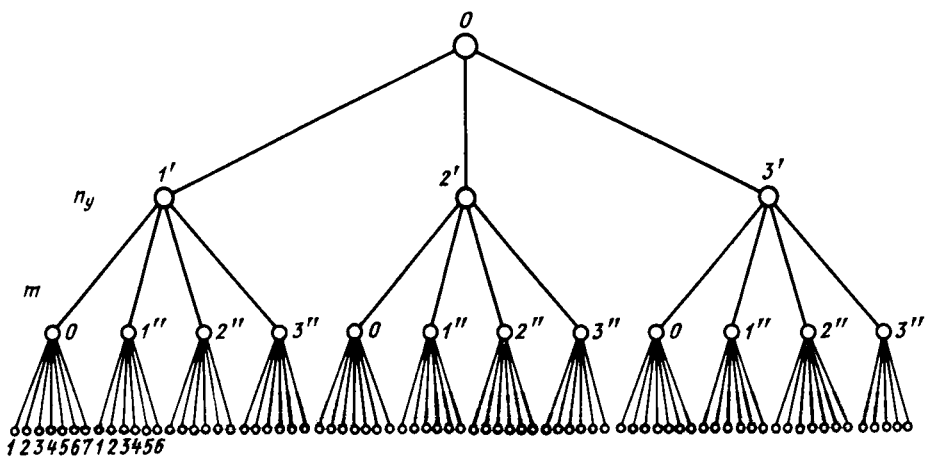


Рис. 272 Участок ветвящегося графа возможных структурно-компоновочных вариантов построения автоматической линии обработки ступенчатых валов:
1' — вариант по числу участков, 0-3'' — вариант по числу станков-дублеров

Следовательно, даже однопоточная линия (автоматическая или поточная, ибо в их число включены и варианты с механизированной транспортной системой, см. рис. 268) может быть построена по 976 структурно-компоновочным вариантам, отличающимся числом рабочих позиций и станков-дублеров, участков-секций, компоновкой транспортных систем.

После того как найдено общее число вариантов, необходимо провести анализ совместимости всех указанных вариационных признаков и скорректировать число вариантов. Если уже принято решение о создании автоматической линии, то варианты поточной линии не рассматривают. Для поточной линии $n_y = q$ транспортная система механизирована. При каждом значении q возможно столько вариантов, сколько имеется вариантов с ветвящимися потоками: $4 + 5 + 6 + 5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 30$ вариантов; остается $S - \Delta S_1 = 976 - 30 = 946$ вариантов.

Для облегчения процессов формиро-

вания общей совокупности возможных вариантов, их систематизации и качественного анализа используют все возможные графические построения, основанные на методе графов. На рис. 272 показан ветвящийся граф возможных вариантов построения однопоточной автоматической линии из четырех станков ($q=4$). Число ребер графа — три, что соответствует числу вариационных признаков. Три луча, проведенные из вершины (0) соответствуют структурным вариантам ($n_y = 1, 2, 4$); из каждой промежуточной вершины проведены четыре луча, соответствующие возможному числу станков-дублеров ($m=0, 1, 2, 3$). Наконец, нижнее ребро графа соответствует числу вариантов транспортной системы: для вариантов с $m=0$ (без дублеров) — семь; для остальных — шесть (нет системы сквозного транспортирования). Всего, согласно рис. 272, возможно 75 вариантов лишь однопоточной простейшей линии из четырех станков.

Глава **32** **Транспортно-загрузочные устройства автоматов и автоматических линий**

§ 1. Механизмы питания для пруткового материала

Механизмы, служащие для выполнения отдельных элементов технологического процесса и частных движений рабочего цикла на автомате и автоматической линии, называют целевыми. Отдельные целевые механизмы автомата и автоматической линии должны быть увязаны как в пространстве, так и по времени для осуществления рабочего цикла без вмешательства человека. Весь комплекс взаимно увязанных целевых механизмов и образует исполнительный механизм рабочей машины. По конструкции и по характеру работы все целевые механизмы могут быть разделены на две группы: механизмы рабочих и холостых ходов.

Целевые механизмы рабочих ходов выполняют операции, связанные с обработкой детали, и обеспечивают рабочие движения обрабатываемого изделия и рабочих органов: суппорты и револьверные головки одношпиндельных и многошпиндельных автоматов, силовые головки, различные приспособления (токарные, фрезерные, резьбонарезные, сверлильные).

Целевые механизмы холостых ходов выполняют операции, не связанные с непосредственной обработкой детали, и обеспечивают подготовку станка для совершения рабочих ходов: механизмы питания, зажимные устройства, механизмы поворота и фиксации, транспортирующие устройства и др. Механизмы, предназначенные для автоматической загрузки и выгрузки обрабатываемых деталей на станки-автоматы и автоматические линии, называют

механизмами питания. Конструкция механизма питания зависит от вида заготовки (бунт, пруток, штучная заготовка) и компоновки автомата и автоматической линии. Основные требования, предъявляемые к механизмам питания, — быстродействие, высокая надежность, долговечность и простота конструкции.

Механизмы питания для пруткового материала широко используют в одношпиндельных и многошпиндельных токарных автоматах. Прутковый материал может иметь круглое, шестигранное, квадратное и другие сечения. Все механизмы питания для пруткового материала делятся на две группы: без подающих цанг и с подающими цангами.

В механизмах питания без подающих цанг прутки подаются под действием собственного веса, с помощью груза, пневматики или роликами. Преимуществами данных механизмов являются простота конструкции и возможность обработки прутков большего диаметра при тех же размерах шпинделя, что и у механизмов с подающими цангами. Недостатки: неудобство заправки прутка при вертикальном расположении шпинделей станка, продольный изгиб прутка под действием груза, вследствие чего увеличиваются биение прутка и шум направляющей трубы. Кроме того, постоянное действие осевой силы на пруток вызывает износ подшипников шпинделя. Подача пруткового материала с помощью груза (реже пневматики) широко используется в автоматах фасонно-продольного точения. Особенность работы данных автоматов состоит в том, что подача прутка в осевом направлении является рабочей подачей.

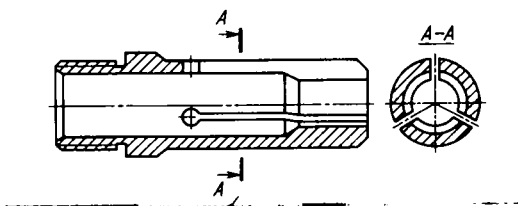


Рис. 273. Подающая цанга

В механизмах питания с подающими цангами перемещение пруткового материала до упора осуществляется с помощью подающей цанги. Подающая цанга (рис. 273), ввинченная в подающую трубу, помещается внутри шпинделя. Она плотно охватывает пружинящими губками обрабатываемый пруток и создает силу трения, достаточную для его перемещения. Перемещение подающей цанги может осуществляться пружиной, грузом или кулачком, отвод — с помощью контркулачка или пружины. Свободный конец обрабатываемого прутка поддерживают направляющими трубами.

§ 2. Механизмы питания для штучных заготовок

При обработке штучных заготовок на станках-автоматах их загрузку и выгрузку можно производить с помощью бункерных или магазинных механизмов питания, автооператоров, манипуляторов или промышленных роботов.

Бункерный механизм питания (рис. 274) состоит из бункерно-ориентирующего устройства и автооператора, между которыми расположен лоток-накопитель (магазин) 6. Бункерное питание — это процесс автоматической ориентации и подачи заготовок из бункера в зажимной патрон шпинделя станка и съем их после обработки.

Бункерно-ориентирующее устройство включает бункер 1, механизм выборки 2, механизм разрушения сводов 3, механизм ориентации 4, предохранительный механизм 5. Автооператор состоит из отсекаателя 7, механизма подачи (питателя) 8, захвата питателя 9, заталкивателя 10, выталкивателя 11, отводящего устройства 12. Бункерные механизмы питания широко применяют в массовом и крупносерийном производстве при обработке заготовок срав-

нительно несложной конфигурации, небольших размеров и с непродолжительным циклом обработки. Загрузочное устройство, в которое входит только лоток-накопитель (магазин) и автооператор, называют магазинным. В данных загрузочных устройствах заготовки вручную укладывают в ориентированном положении в магазин, и далее автооператор автоматически подает их в зону обработки. Магазинные загрузочные устройства применяют в массовом или крупносерийном производстве при обработке заготовок, захват и ориентация которых затруднены из-за их геометрической формы, размеров или массы.

Рассмотрим основные исполнительные механизмы бункерного механизма питания.

Бункерно-ориентирующее устройство предназначено для накопления заготовок, их выборки, ориентации и выдачи в лоток-накопитель.

Накопление заготовок происходит в бункере — емкости определенной формы и объема. Заготовки в бункере засыпаются в неориентированном положении (навалом). В бункере располагаются механизмы захвата, ориентации, разрушения сводов и другие устройства. Механизм выборки заготовок, или захватное устройство, предназначен для поштучной выборки заготовок из бункера и передачи их в механизм ориентации.

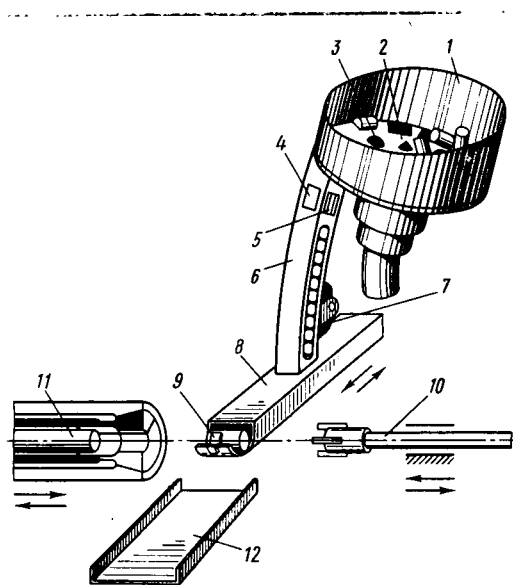


Рис. 274. Бункерный механизм питания

По способу поштучной выборки заготовок из общей массы в бункере все бункерно-ориентирующие устройства делятся на две группы: с захватными органами, без захватных органов.

В устройствах первой группы используются механические захватные устройства, которые производят выборку заготовок из бункера захватными органами (крючками, штырями, шиберами, дисками с карманчиками и т. д.), совершающими возвратно-поступательные или вращательные движения. Их общими недостатками являются нали-

чие большого числа движущихся деталей и трущихся поверхностей; интенсивное перемешивание заготовок и связанные с ним большие силы, износ; возможность поломок захватных органов и повреждения поверхности подаваемых заготовок. В устройствах второй группы выборка заготовок из бункера производится за счет сил трения, без использования механических захватных органов. Среди устройств второй группы наиболее перспективными являются вибрационные загрузочные устройства, в которых заготовки перемешаются по лоткам за счет сил

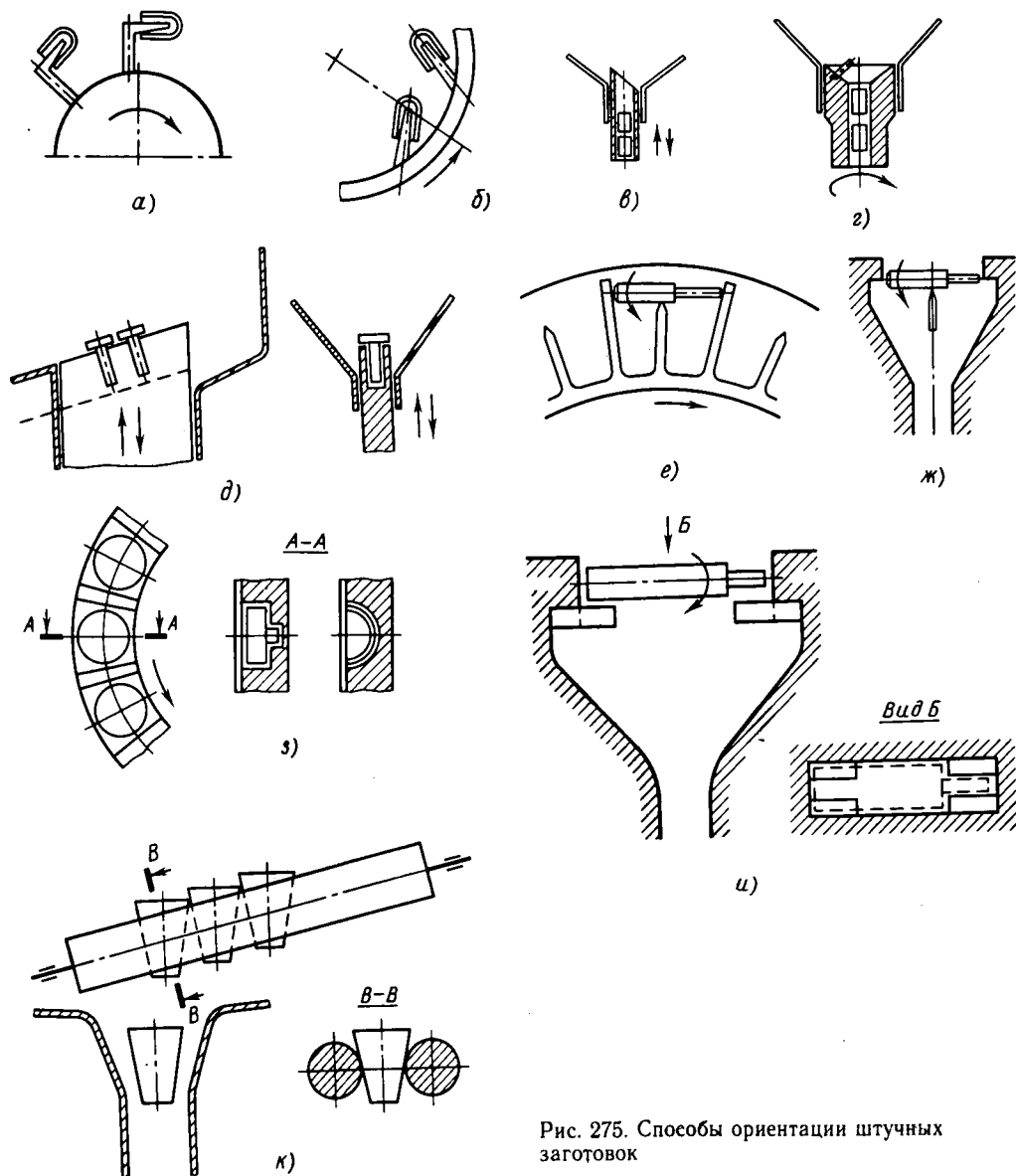


Рис. 275. Способы ориентации штучных заготовок

инерции и трения, возникающих при колебании лотков. Методы захвата и ориентации заготовок являются наиболее типичными признаками, характеризующими работу бункерно-ориентирующего устройства. Существует ряд методов и средств ориентации, применение которых зависит от формы и размеров подаваемых заготовок.

Рассмотрим некоторые способы ориентации заготовок в загрузочных устройствах первой группы (рис. 275). Заготовки типа колпачков или трубок, у которых длина больше диаметра, ориентируют надеванием на крючок или штырь. Крючки располагаются на периферии, на внутренней поверхности диска (рис. 275, а, б) или на непрерывной ленте.

Ориентацию западанием в трубку (рис. 275, в, г) применяют для мелких заготовок типа шариков, роликов или стержней, длина которых составляет 1,2—1,5 диаметра. Этот способ ориентации деталей используют в бункерных загрузочных устройствах с возвратно-поступательным или вращательным движением ориентирующей трубки. Ориентацию заготовок с головками (болты, винты и т. д.), а также деталей типа дисков или пластин (шайбы, гайки и т. д.) можно производить с помощью щели, выполненной в секторе (рис. 275, д), совершающем прямолинейное или качательное движение.

Заготовки со смещенным центром тяжести ориентируют на ноже, расположенном в кармане диска (рис. 275, е), или в специальном ориентирующем устройстве, установленном за окном выдачи заготовки из диска (рис. 275, ж). Ориентацию заготовок по профильным карманам применяют для деталей типа низких колпачков или дисков, имеющих различную форму торцовых поверхностей (рис. 275, з). Этот способ ориентации используют в карманчиковых бункерных загрузочных устройствах. Дисковые бункерные загрузочные устройства используют также для подачи стержневых заготовок, концы которых имеют различный профиль (рис. 275, и). Ориентация заготовок осуществляется после их выдачи из кармана диска на профильных губках. Для ориентации и подачи деталей типа конических роликов исполь-

зуют вращающиеся цилиндрические валки с параллельными осями (рис. 275, к). Валки расположены так, что расстояние между их образующими напротив окна выдачи больше максимального диаметра ролика.

Лоток-накопитель (магазин) предназначен для создания запаса заготовок между бункерно-ориентирующим устройством и автооператором для компенсации неритмичности подачи заготовок из бункерно-ориентирующего устройства к автооператору. Конструктивные формы лотков-накопителей зависят в первую очередь от конфигурации заготовок и метода транспортирования, который может осуществляться под действием собственного веса и принудительно.

В зависимости от конструкции загрузочного устройства лотки могут быть расположены горизонтально, вертикально или иметь форму спирали. Обычно лотки изготовляют из листовой стали. Трущиеся поверхности лотков шлифуют и подвергают термической обработке. В двух стенках закрытых коробчатых лотков выполняют пазы для наблюдения и выборки застрявших заготовок.

При конструировании лотка необходимо учитывать, что величина зазора (рис. 276) между заготовкой и стенками лотка оказывает влияние на расположение заготовки в лотке и на ее проходимость в нем. Способность заготовки сохранять ориентацию в лотке без опасного перекоса зависит от отношения длины заготовки к ее диаметру и конфигурации заготовки. Предельный зазор Δ между лотком и заготовкой можно определить по формуле (рис. 276, а)

$$\Delta = \frac{\sqrt{D_n^2 + L_n^2}}{\sqrt{1 + \mu_1^2}} - L_n,$$

где D_n , L_n — соответственно диаметр и длина заготовки; $\mu_1 = \operatorname{tg} \gamma$ — коэффициент трения заготовки о лоток. Для заготовок $D_n = D_1$ (рис. 276, б), $D_n = D_\phi = \frac{d_1 + d_2}{2}$ (рис. 276, в). При расчетах предельного зазора Δ используют наименьшие размеры заготовок. При проектировании лотка необходимо иметь в виду, что $\Delta_{\max} \leq \Delta$, где $\Delta_{\max}$ —

наибольший расчетный зазор, который определяют по формуле

$$\Delta_{\max} = \Delta L_{\text{н}} + \Delta B + \Delta_{\min},$$

где $\Delta L_{\text{н}}$, $\Delta B_{\text{н}}$ — допуски соответственно на длину и ширину лотка, мм; $\Delta_{\min}$ — наименьший зазор между лотком и заготовкой.

Автооператор предназначен для загрузки ориентированных заготовок в патрон шпинделя станка, а также съема и выведения деталей из зоны обработки. В соответствии с этим автооператор включает следующие механизмы (см. рис. 274): отсекаТЕЛЬ, питатель, заталкиватель, выталкиватель или съемник, отводящее устройство. В отличие от бункерно-ориентирующего устройства, которое, как правило, не имеет жесткой кинематической связи со станком, автооператор работает в ритме работы станка согласованно с остальными механизмами, прежде всего механизмом зажима.

Отсекатель (механизм поштучной выдачи), расположенный в нижней части лотка, отделяет одну или несколько

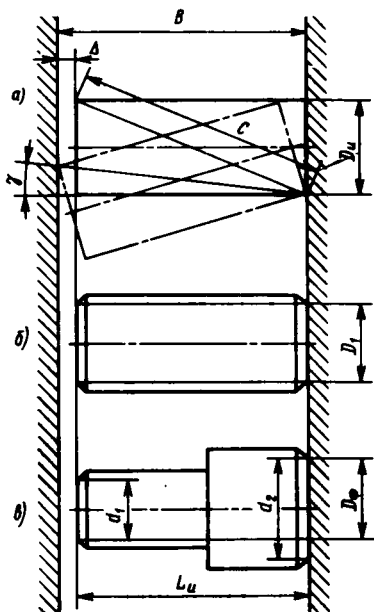


Рис. 276. Расчетная схема лотка:

B — ширина лотка; C — длина заготовки по оси фаски; D_1 — диаметр заготовки до начала фаски; γ — угол наклона диагонали заготовки к лотку; D_ϕ — расстояние между точками начала фаски при ступенчатых заготовках.

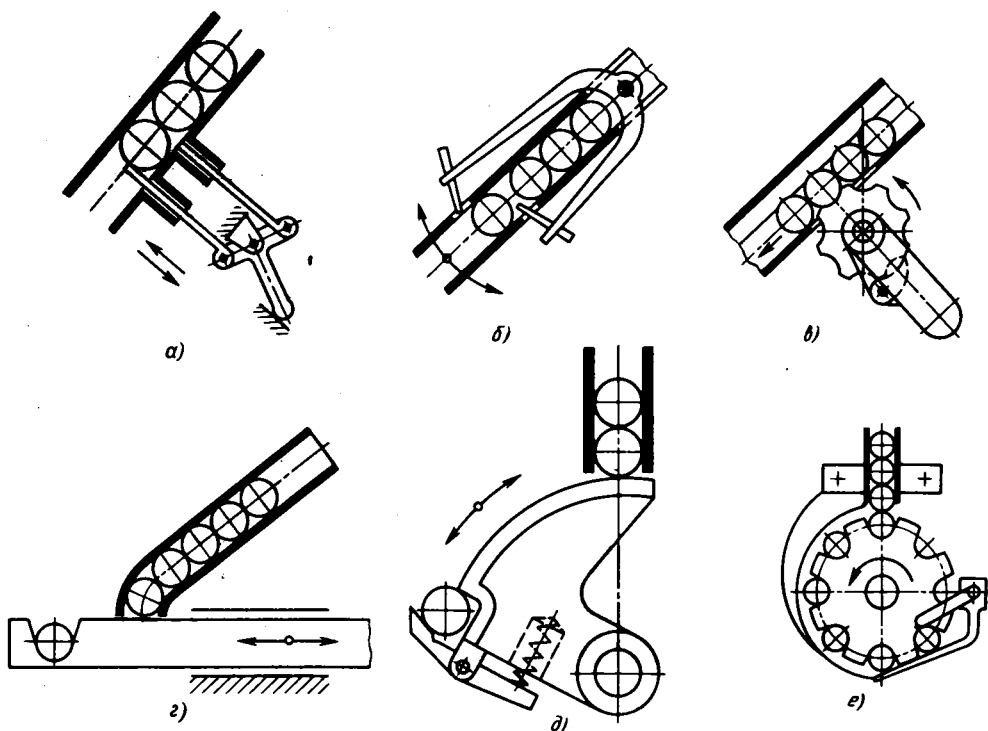


Рис. 277. Отсекатели и питатели.

заготовок (в зависимости от числа одновременно обрабатываемых на станке), от общего числа заготовок, находящихся в лотке-накопителе. Отсекатель работает обычно в два такта: при первом такте освобождается нижняя заготовка и под действием собственного веса перемещается к питателю, остальные заготовки удерживаются на месте; при втором — «столб» оставшихся заготовок перемещается на один шаг.

Отсекающие звенья в отсекателе могут совершать возвратно-поступательное (рис. 277, а), колебательное (рис. 277, б), вращательное (рис. 277, в) или сложное движения.

Питатель — механизм, осуществляющий подачу заготовок из лотка-накопителя к шпинделю станка. Питатель имеет зажимное или иное устройство, которое фиксирует заготовку в определенном положении как во время переноса из лотка-накопителя к шпинделю, так и во время вывода обработанной детали из рабочей зоны станка. Конструкции питателей весьма разнообразны и зависят от конструкции станка и его компоновки, формы и размеров заготовки и т. д. На рис. 277 приведены конструкции некоторых типов питателей: питатель с возвратно-поступательным движением (рис. 277, г), с колебательным движением (рис. 277, д) и с вращательным движением (рис. 277, е).

Заталкиватели служат для передачи заготовок из питателя в шпиндель станка, т. е. они производят непосредственную установку заготовки в зажимном устройстве шпинделя станка.

Выталкиватели или съемники предназначены для удаления обработанных деталей из патрона шпинделя станка. Съемники представляют собой скобы или кольца, их используют при обработке деталей типа колец для съема их с центрирующих или зажимных оправок.

§ 3. Вибрационные загрузочные устройства

Вибрационные загрузочные устройства (ВЗУ) используются для подачи деталей самой разнообразной конфигурации и размеров (шайбы, гайки, винты, детали радиотехнической промыш-

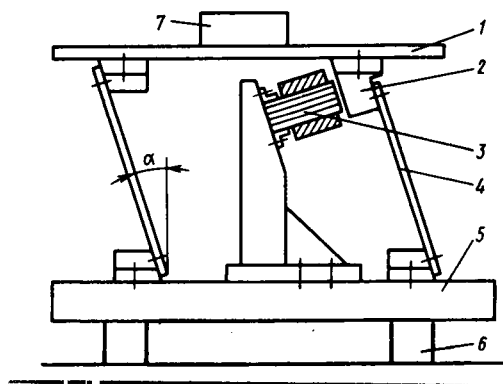


Рис. 278. Принципиальная схема вибрационного загрузочного устройства с прямолинейным лотком

ленности и т. д.) и из различного материала (сталь, чугун, медь, текстолит, стекло и т. д.). ВЗУ имеют прямые и спиральные (круговые) лотки. Перемещение заготовок по лоткам в них осуществляется за счет сил инерции и трения, возникающих при колебании лотков. В качестве привода в ВЗУ используют электромагнитные, диаллансные, пневматические и гидравлические вибраторы. Наиболее широкое применение получили электромагнитные вибраторы, позволяющие производить плавное регулирование амплитуды колебаний лотка путем изменения напряжения в цепи питания электромагнита.

На рис. 278 показана принципиальная схема ВЗУ с прямолинейным лотком. Оно включает лоток 1, подвески (пружины) 4, установленные под углом α к вертикали, якорь 2, электромагнитный вибратор 3, основание 5 и амортизаторы 6. При питании электромагнита переменным или постоянным пульсирующим током лоток 1 получит колебания с высокой частотой и малой амплитудой, и заготовка 7 будет перемещаться при определенных условиях относительно лотка (по рис. 278 вправо). Скорость перемещения заготовки зависит от величины амплитуды и частоты колебания лотка.

Проектирование ВЗУ связано с определением оптимальных режимов движения заготовок по вибрирующему лотку, амплитуды колебания лотка и таких параметров устройства, как углов наклона подвесок и подъема лот-

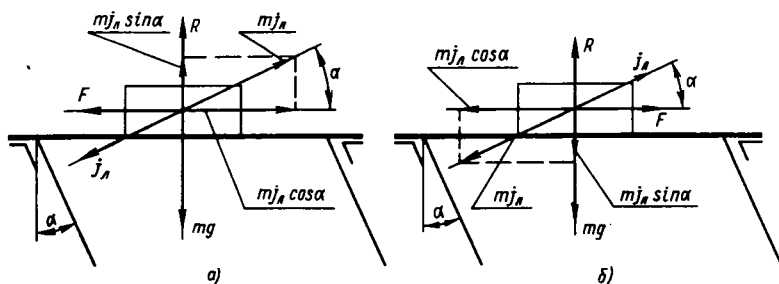


Рис. 279. Схема сил, действующих на заготовку, находящуюся на вибрирующей лотке

ка, геометрических размеров пружин подвесок, соотношений масс основания и колеблющихся частей, требуемой силы электромагнитов и др.

Рассмотрим движение заготовки по горизонтальному вибрирующему лотку. При использовании электромагнитного привода в ВЗУ лоток получает гармонические колебания. Законы колебания лотка выражаются формулами

$$\left. \begin{aligned} S_n &= \frac{\delta}{2}(1 - \cos \omega t); \\ v_n &= \frac{\delta \omega}{2} \sin \omega t; \\ j_n &= \frac{\delta \omega^2}{2} \cos \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (224)$$

где S_n — перемещение лотка; δ — размах колебаний лотка; $\omega = 2\pi f_n$ — круговая частота колебаний лотка (f_n — частота колебаний лотка); t — время перемещения лотка; v_n — скорость лотка; j_n — ускорение лотка.

На рис. 279, а показана схема сил, действующих на заготовку при движении лотка вперед (по схеме вправо). Направление колебания лотка не совпадает с его рабочей плоскостью благодаря наклонному расположению подвесок под углом α к вертикали. На заготовку, находящуюся на вибрирующей лотке, действуют сила трения F , стремящаяся переместить заготовку вместе с лотком; сила инерции $m j_n$ (движущая сила) и сила тяжести mg .

Сила трения $F = R \mu_1$, где R — реакция действующих на лоток сил; μ_1 — коэффициент трения покоя заготовки о лоток. Реакция $R = mg - m j_n \sin \alpha$, тогда $F = (mg - m j_n \sin \alpha) \times \mu_1$.

Проскальзывание заготовки по лотку возможно лишь тогда, когда силы инерции будут больше сил трения, значит проскальзывание заготовки относительно лотка будет возникать при условии $m j_n \cos \alpha > (mg - m j_n \sin \alpha) \mu_1$.

Значение критического ускорения лотка j_{+1} , при котором заготовка начинает перемещаться вперед относительно лотка, может быть определено из условия $m j_n \cos \alpha = (mg - m j_n \sin \alpha) \mu_1$.

При $j_n = j_{+1}$ это выражение примет вид

$$j_{+1} = \frac{g \mu_1}{\cos \alpha + \mu_1 \sin \alpha}. \quad (225)$$

Критерием оценки режимов движения заготовок по вибрирующим лоткам считаем амплитуду колебания лотка в горизонтальной плоскости $X_{\max}$. Тогда, согласно уравнениям (224), при $\cos \omega t = 1$ получим

$$X_{\max} = \frac{j_n \cos \alpha}{\omega^2}. \quad (226)$$

Подставляя в формулу (226) значение критического ускорения лотка j_{+1} из формулы (225), получим значение критической амплитуды колебания лотка, при которой заготовка начинает проскальзывать вперед относительно лотка:

$$X_{+1} = \frac{g \mu_1}{\omega^2 (1 + \mu_1 \tan \alpha)}. \quad (227)$$

При изменении направления движения лотка изменятся и направления действия ускорения и действующих сил (рис. 279, б). Тогда условие проскальзывания заготовки назад будет иметь вид

$$m j_n \cos \alpha > (mg + m j_n \sin \alpha) \mu_1,$$

а критическое ускорение j_{-1} и амплитуду колебания лотка X_{-1} начала обратного проскальзывания можно рассчитать по формулам

$$j_{-1} = \frac{g\mu_1}{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha};$$

$$X_{-1} = \frac{g\mu_1}{\omega^2(1 - \mu_1 \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (228)$$

Так как плоскость колебаний лотка не совпадает с плоскостью лотка, а образует с ней угол α , то силы инерции $m j_{-1} \sin \alpha$ при прямом движении лотка (рис. 279, а) будут уменьшать реакцию действующих на лоток сил R , а следовательно, и силу трения F , а при обратном движении (рис. 279, б) увеличивать. Поэтому за один период колебания лотка заготовка будет проскальзывать вперед на большую величину, чем в обратном направлении, а при большом числе колебаний в секунду будет наблюдаться перемещение заготовки по лотку со значительной скоростью.

При увеличении амплитуды колебания лотка увеличиваются силы инерции, действующие на заготовку. Поэтому при движении лотка вперед может наступить момент, когда реакция действующих на лоток сил будет равна нулю (рис. 279, а). В этот момент заготовка оторвется от лотка и будет некоторое время находиться в полете. Критическое ускорение j_0 и амплитуду колебания лотка X_0 при отрыве заготовки от его поверхности определяют по формулам

$$j_0 = \frac{g}{\sin \alpha}; \quad X_0 = \frac{g}{\omega^2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (229)$$

Таким образом, в зависимости от условий, в которых находится заготовка на вибрирующем лотке, она может перемещаться по нему в различных режимах, которые можно разделить на две группы: 1) режимы движения с проскальзыванием, когда заготовка проскальзывает относительно лотка в прямом или обратном направлении без отрыва; 2) режим движения с подбрасыванием, когда заготовка, кроме проскальзывания, отрывается от лотка и некоторое время находится в полете. Следует отметить, что после отрыва от лотка заготовка может находиться в полете меньше или больше

одного периода колебаний лотка. Поэтому в зависимости от времени нахождения в полете заготовка может упасть на лоток в момент его обратного или прямого хода, или когда возникнут условия прямого проскальзывания или отрыва.

Скорость перемещения заготовок по вибрирующему лотку в различных режимах различна. Она зависит от параметров загрузочного устройства — угла α наклона подвесок, угла θ подъема лотка, частоты колебания f_n лотка, амплитуды колебания лотка и др. Кроме того, на скорость перемещения влияют такие факторы, как изменение сил трения заготовки о лоток, упругое соударение заготовки с лотком после полета, форма заготовки и др. Аналитически определить скорость перемещения заготовок по вибрирующим лоткам в различных режимах движения очень сложно, так как дифференциальные уравнения движения на отдельных этапах (т. е. при скольжении или при полете) различны.

Наиболее просто теоретическая скорость перемещения заготовок по вибрирующему лотку может быть определена в режиме непрерывного подбрасывания, который характеризуется тем, что заготовка после полета попадает на лоток в момент возникновения условий отрыва, и опять отрывается и летит, т. е. она непрерывно находится в полете и соприкасается с лотком только на мгновение для получения нового импульса для полета.

Критическую амплитуду колебания лотка в режиме непрерывного подбрасывания определяют по формуле

$$X_n = \frac{g\sqrt{\pi^2 n^2 + 1}}{\omega^2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (230)$$

где n — число периодов колебания лотка, в течение которых заготовка находится в полете.

Принимая, что теоретическая скорость заготовки в режиме непрерывного подбрасывания равна горизонтальной скорости лотка в момент отрыва от него заготовки, и учитывая ряд факторов (наличия упругого удара заготовки о лоток после полета и др.), влияющих на снижение скорости, была выведена формула:

$$v_n = \frac{206}{f_n \operatorname{tg} \alpha}, \quad (231)$$

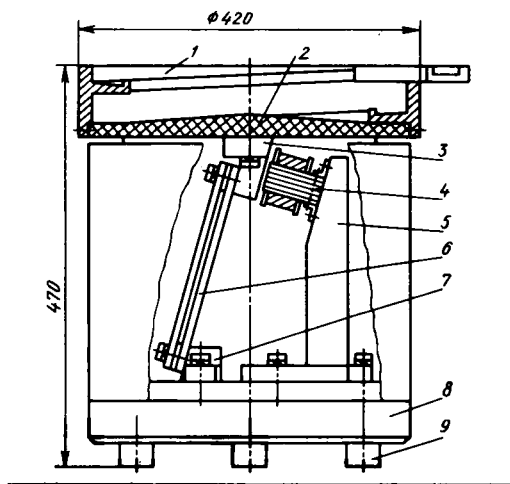


Рис. 280. Вибрационное загрузочное устройство

где v_n — практическая скорость перемещения заготовок по вибрирующему лотку в режиме непрерывного подбрасывания при амплитуде колебания лотка $X_{\max} = X_n$ м/мин; f_d — частота колебания лотка, 1/с; α — угол наклона подвесок, °.

Формула (231) показывает, что с уменьшением угла α наклона подвесок, при $f_d = \text{const}$ скорость перемещения заготовок по вибрирующему лотку увеличивается.

Все выведенные зависимости справедливы для ВЗУ как с прямолинейными, так и со спиральными лотками.

В ВЗУ со спиральными лотками используют три или один электромагнит. При использовании одного электромагнита вибратор устанавливают в середине основания, он сообщает бункеру вертикальные колебания. Конструкция ВЗУ со спиральным лотком и тремя электромагнитами в приводе, разработанного в МВТУ им. Н. Э. Баумана [5], приведена на рис. 280. Оно состоит из бункера 1 со спиральным лотком (угол наклона спирали лотка $\theta = 1^\circ 35'$, материал — алюминий); основания бункера 2, выполненного из текстолита; трех кронштейнов с якорями 3; трех электромагнитных вибраторов 4, закрепленных на кронштейнах 5, трех подвесок (пружины) 6, которые прикреплены к кронштейнам с якорями 3 и кронштейнам 7. Кронштейны 5 с электромагнитными вибраторами и

кронштейны 7, установлены на массивном основании 8. Для того чтобы вибрации не передавались на станок, загрузочное устройство установлено на резиновых амортизаторах 9. Подвески 6 выполнены из набора плоских пружин. Зазор между якорем и электромагнитом вибратора изменяют перемещением кронштейна 5 относительно основания 8. Питание электромагнитов вибраторов осуществляется от однополупериодного выпрямителя. Частота колебаний спирального лотка 3000 колебаний/мин.

Особенность работы вибрационных загрузочных устройств состоит в том, что заготовки в них ориентируются в процессе их перемещения по вибрирующему лотку. При этом выбор способа ориентации зависит от формы перемещаемых заготовок. Некоторые способы ориентации деталей простой конфигурации приведены на рис. 281.

Заготовки типа дисков, колец, квадратных или прямоугольных пластин можно ориентировать и подавать в один слой по спиральному лотку, выполненному с наклоном к центру бункера на угол $\beta = 3 + 5^\circ$ (рис. 281, а). Высота буртика лотка меньше высоты заготовки. При перемещении заготовок детали второго слоя соскальзывают в бункер. Колпачки, высота которых равна диаметру или меньше его ($h \leq d$), ориентируют на плоском лотке с помощью выреза с язычком (рис. 281, б). Заготовки, перемещающиеся отверстием вверх, проходят над язычком, а заготовки, расположенные отверстием вниз, выпадают в вырез лотка. Способ ориентации заготовок типа роликов или трубочек $d < l$ показан на рис. 281, в. Заготовки, перемещающиеся вертикально, сбрасываются козырьком в чашу бункера. Заготовки с головками (болты, винты и т. д.) можно ориентировать пазом на выходе со спирального лотка на прямолинейном участке (рис. 281, г). На рис. 281, д показан способ ориентации двухступенчатых заготовок. Заготовки, расположенные большим диаметром вниз, перемещаются по лотку, а заготовки, расположенные большим диаметром вверх, сбрасываются козырьком.

Однако некоторые детали сложной конфигурации и детали со скрытыми признаками (ключами) ориентации невозможно ориентировать в процессе

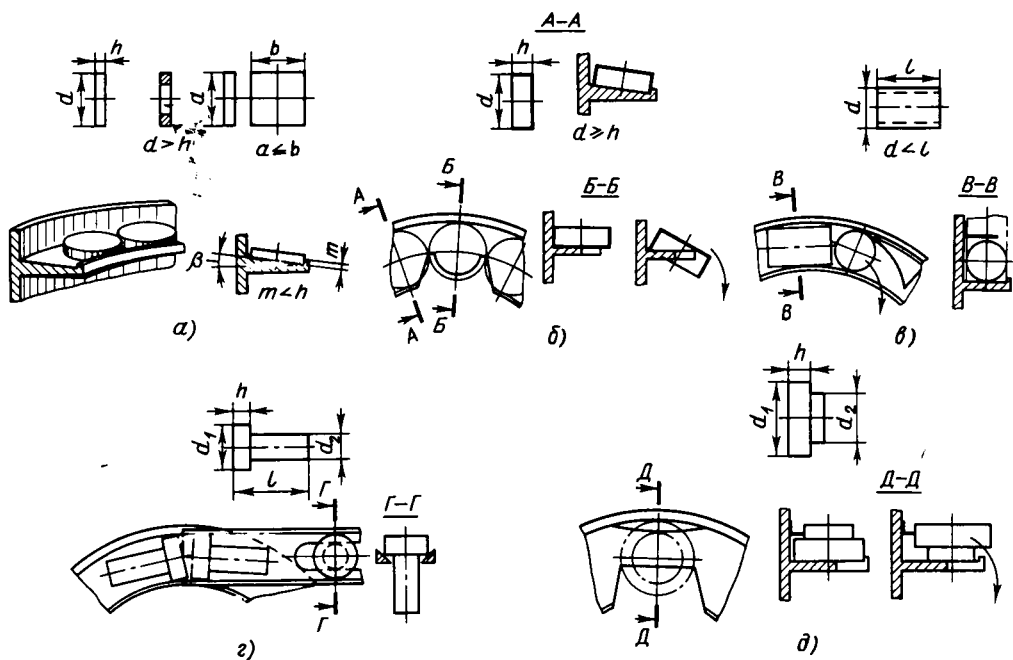


Рис. 281. Способы ориентации заготовок в ВЗУ:

d — диаметр заготовки; h — высота заготовки (головки); a, b — размеры сторон заготовки; m — высота буртика лотка; l — длина заготовки; d_1, d_2 — диаметры ступеней заготовки

перемещения их по лотку ВЗУ или с использованием других механических способов. В данном случае может быть использован метод опознавания и ориентирования деталей с помощью электродинамических сил [10]. Этот метод позволяет ориентировать детали из токопроводящих немагнитных материалов.

Для примера на рис. 282 показан способ ориентации деталей типа уголков, скоб и других подобных форм. При использовании ВЗУ детали предварительно ориентируются и подаются в зону вторичной ориентации. С точки зрения электродинамического воздействия сложное по форме токопроводящее тело, помещенное в переменное магнитное поле, можно рассматривать как состоящее из отдельных элементарных токовых контуров. Тогда определение силового воздействия в первом приближении сводится к сложению сил. Это значит, что асимметричные скобы с отверстиями, пазами, вырезами могут быть условно рассмотрены в виде скобы-аналога, у которой отдельные ее элементы симметричны по форме, но асимметричны по электропроводимости.

При подаче такой детали из положения 1 в направлении оси симметрии переменного магнитного поля в отдельных вертикальных участках скобы индуцируются токи i_1 и i_2 . В процессе взаимодействия этих токов с неоднородным магнитным полем образуются

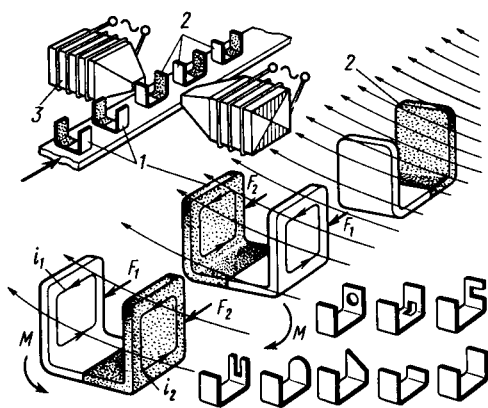


Рис. 282. Ориентация заготовок посредством электродинамических сил (ЭМАГО):

1 — предварительно ориентированные детали; 2 — окончательно ориентированные детали; 3 — полюса электромагнитного поля

суммарные составляющие электродинамических сил. Допустим, что центр тяжести у скобы-аналога расположен на геометрической оси, что для ориентирования обычными методами особенно сложно, а часть детали (на рисунке затемнена) обладает меньшей электропроводимостью. Тогда на отдельные вертикальные части скобы в таком неоднородном переменном магнитном поле действуют силы F_1 и F_2 , причем $F_1 > F_2$. Под воздействием этих сил возникает момент M , разворачивающий скобу-аналог в положение 2. При любом исходном положении 1 деталь будет сорентирована в положение 2. Задача вторичного ориентирования различных втулок, роликов, пробок, зубчатых колес по определенному торцу (левому или правому) и конструктивным признакам, в том числе и скрытым, решается подобным же образом, что и задача ориентирования деталей, указанных на рис. 282.

Данный способ позволяет производить бесконтактную ориентацию с высокой скоростью.

Рассмотрим порядок расчета вибрационного загрузочного устройства со спиральным лотком и с тремя электромагнитами в приводе. Данные для расчета: требуемая производительность Q загрузочного устройства, чертеж детали, материал детали, частота колебаний лотка.

1. Определение требуемой скорости перемещения заготовок по лотку:

$$v_{\text{тр}} = \frac{Q d_3}{1000} \eta,$$

где d_3 — диаметр или длина заготовки, мм; η — коэффициент, учитывающий неравномерность перемещения заготовок, способ их ориентации и др.: $\eta > 1 \div 2$.

2. Определение параметров чаши бункера. Размеры чаши, форма лотка и другие конструктивные размеры выбирают в зависимости от габаритных размеров заготовки и выбранного способа ориентации.

3. Определение угла θ подъема спирального лотка

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{t}{\pi D},$$

где t — шаг спирали, мм; D — внутренний диаметр чаши бункера, мм.

4. Определение требуемой скорости $v'_{\text{тр}}$ перемещения заготовок с учетом угла θ подъема лотка.

При увеличении угла θ скорость заготовки уменьшается, например, при $\theta = 2^\circ$ скорость уменьшается на 10—15%:

$$v'_{\text{тр}} = v_{\text{тр}} K,$$

где $K = 1,1 \div 1,3$ — коэффициент, учитывающий уменьшение скорости заготовки.

5. Определение требуемого угла α наклона подвесок исходя из обеспечения необходимой скорости перемещения заготовок:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{206}{f n v'_{\text{тр}}}.$$

При определении угла α наклона подвесок считают, что предельная скорость перемещения заготовок, которую может обеспечить данное загрузочное устройство, — это скорость перемещения в режиме непрерывного подбрасывания, т. е. при $X_{\text{max}} = X_n$. Любая скорость меньше предельной может быть получена изменением амплитуды колебания лотка. Поэтому скорость $v'_{\text{тр}}$ выбирают заведомо большей требуемой для получения заданной производительности загрузочного устройства. Угол $\alpha = 5 \div 35^\circ$.

6. Определение амплитуды колебания лотка X_n , при которой обеспечивается скорость $v'_{\text{тр}}$: при $n = 1$

$$X_n = \frac{g \sqrt{\pi^2 n^2 + 1}}{\omega^2 \operatorname{tg} \alpha}.$$

7. Определение параметров пружин подвесок (рис. 283). Для получения больших амплитуд колебаний лотка при малых силах, создаваемых электромагнитом, необходимо, чтобы вибрационная система работала в режиме, близком к резонансу. Собственная частота системы зависит от жесткости пружин. Рекомендуется, чтобы собственная частота колебаний системы была на 10% больше частоты колебаний возмущающей силы.

Конструктивно подвески могут быть выполнены круглыми или плоскими (набранными из пластин). Длину и ширину плоских пружин задают, а толщину определяют по формуле

$$a = \frac{l}{372} \sqrt[3]{\frac{G \varphi^2}{\pi i b}},$$

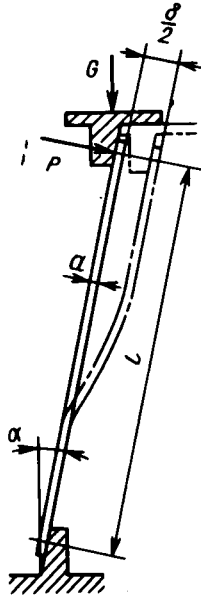


Рис. 283. Расчетная схема пружин ВЗУ

где l — рабочая длина пружины, см; G — вес колеблющихся частей подвесок и загруженных в бункер заготовок; $\varphi = 1,1 \dot{f}_n$ — собственная частота колебаний системы, $1/c$; n — число подвесок; i — число пружин в подвеске; b — ширина пружины, см.

8. Определение максимального напряжения изгиба пружин при амплитуде колебания лотка X_n

$$\sigma_{изг} = \frac{3Ea\delta}{l^2 \cdot 2},$$

где E — модуль упругости, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\frac{\delta}{2} = \frac{X_n}{\cos \alpha}$ — амплитуда колебания лотка.

9. Определение требуемой силы P одного электромагнита:

$$P = \frac{X_n E b a^3 i}{l^3 \mu \cos \alpha},$$

где $\mu = \frac{1}{1 - \left(\frac{\dot{f}_n}{\varphi}\right)^2}$ — динамический коэффициент.

Далее, зная необходимую силу тяги, создаваемую электромагнитом, определяют его параметры.

10. Отношение массы основания к массе колеблющихся частей должно быть не менее 5—7.

Конвейерные системы автоматических линий обеспечивают перемещение обрабатываемых деталей с позиции на позицию (от станка к станку). Характер работы и состав системы межстаночного конвейера автоматической линии зависят от вида заготовки и характера протекания технологического процесса, так как часто в процессе транспортирования деталей производится их поворот и ориентация, разделение потоков, загрузка и разгрузка рабочих позиций и другие операции. В автоматических линиях используются конвейерные системы с жесткой и гибкой связью.

В автоматических линиях для обработки крупногабаритных деталей или деталей со сложным технологическим процессом часто используют конвейерные системы с жесткой связью. В таких линиях детали, установленные на конвейере, проходят через все рабочие позиции обработки. Во время обработки деталь, находясь на конвейере, зафиксирована и зажата по базовым поверхностям. Только после окончания обработки на всех позициях линии подается сигнал на включение конвейера (перемещение обрабатываемых деталей).

Некоторые схемы шаговых конвейеров приведены на рис. 284. В шаговом конвейере с собачками (рис. 284, а) перемещение деталей 2 осуществляется штангой 1, которая, получая медленное перемещение вперед, захватывает собачками обрабатываемую деталь. После перемещения на один шаг детали фиксируются и зажимаются, а штанга быстро отводится назад, при этом собачки «утапливаются». В качестве привода чаще всего применяют гидроцилиндр. Шаговые конвейеры с флажками (рис. 284, б) обеспечивают более точное перемещение и базирование деталей 2 на позициях. После окончания обработки на всех позициях линии штанга 1 поворачивается вокруг своей оси, деталь захватывается флажками 3, и штанга перемещается вперед на один шаг. Далее производится фиксация и закрепление деталей, поворот и быстрый отвод штанги в обратном направлении.

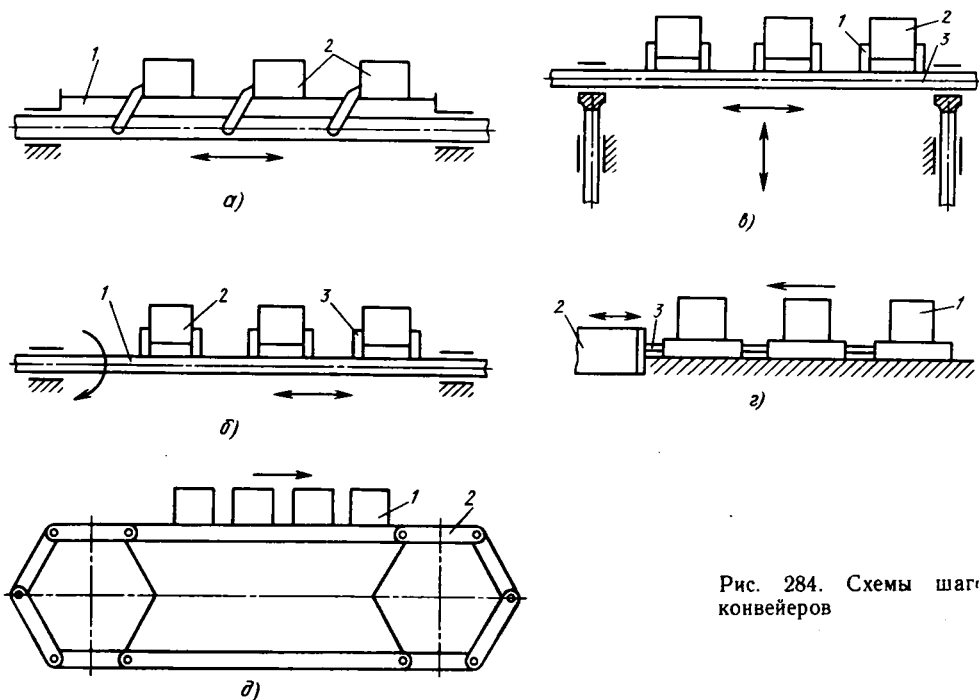


Рис. 284. Схемы шаговых конвейеров

В грейферных шаговых конвейерах (рис. 284, в) перемещение обрабатываемых деталей 2 производится флажками 1 штанги 3. При этом штанга 3 совершает перемещение вверх, вперед (рабочий ход), вниз и назад (холостой ход). Конвейеры подобного типа применяют в тех случаях, когда обрабатываемую деталь необходимо сначала поднять, а затем переместить.

В автоматических линиях с жесткой связью также применяют шаговые конвейеры толкающего типа (рис. 284, г), цепные (рис. 284, д) и др.

Автоматические линии с гибкой конвейерной системой обычно используют для обработки мелких и средних де-

талей, особенно в тех случаях, когда допускается частичная или полная потеря ориентации обрабатываемой детали между позициями обработки. В системах с гибкой связью каждый станок или каждый участок линии имеет свою конвейерную систему, работающую самостоятельно независимо от станков. Поэтому время транспортирования обрабатываемых деталей частично или полностью совмещено со временем обработки. В данном случае поломка одного станка не вызывает остановку всей линии.

На рис. 285 приведена конвейерная система с гибкой связью автоматической линии по обработке колец подшип-

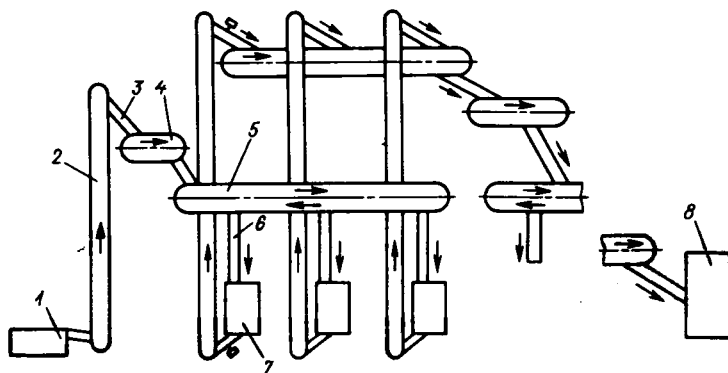


Рис. 285. Схема конвейера с гибкой связью

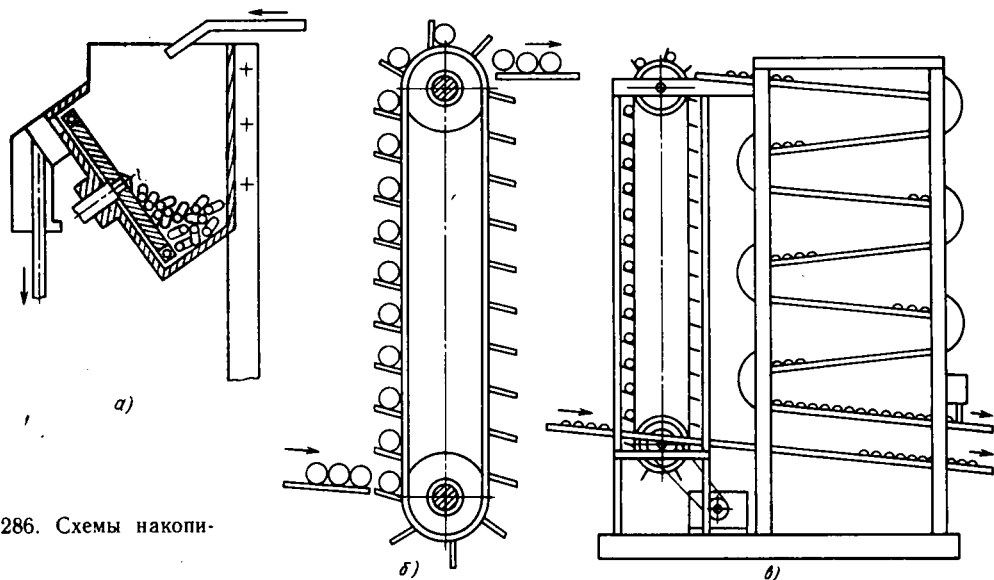


Рис. 286. Схемы накопителей

ников. Заготовки колец загружают в бункерное загрузочное устройство 1, откуда они в ориентированном положении подаются подъемником 2 в расположенную вверх транспортную систему. По лоткам 3 и отводящему конвейеру 4 заготовки подаются на конвейер-распределитель 5, с которого по лоткам 6 они поступают к параллельно работающим станкам 7, далее аналогичная конвейерная система подает кольца на вторую операцию и т. д. В конце участка обработанные на автоматической линии кольца поступают в магазин 8.

В конвейерных системах с гибкой связью применяют конвейеры-распределители, делители потоков, подъемники, ритмопитатели, накопители и другие механизмы. Накопители используют для создания запасов заготовок между отдельными станками или участками ав-

томатических линий. Их используют в автоматических линиях как с жесткой, так и с гибкой конвейерной связью. Межоперационные накопители обеспечивают бесперебойную работу автоматической линии при выходе из строя какого-либо станка. Тупиковые накопители, которые устанавливают между секциями, работающими независимо, работают на прием или выдачу только при остановке одной из секций. Применение накопителей улучшает показатели работы автоматической линии, повышая производительность и надежность линии в работе.

Для обеспечения хранения и выдачи межоперационных заделов в зависимости от формы и размеров деталей применяют бункеры- (рис. 286, а), конвейеры- (рис. 286, б) или магазины-накопители (рис. 286, в).

Глава 33 Промышленные роботы

§ 1. Область применения и классификация

Промышленными роботами называют автоматические быстропереналаживаемые универсальные манипуляторы с программным управлением, способные

с помощью механических рук производить захват, ориентацию и транспортирование обрабатываемых деталей или выполнять разнообразные операции, относящиеся к деятельности человека. Промышленные роботы применяют как для выполнения основных технологи

ческих операций (окраски, резки, точечной сварки и т. д.); так и для выполнения вспомогательных операций (обслуживания оборудования, выполнения погрузочно-разгрузочных работ при обслуживании металлорежущего, сборочного, кузнечно-прессового, литейного и другого оборудования, и т. д.).

Роботы позволяют освободить человека от выполнения тяжелого, быстротомляющего ручного труда, а также в тех случаях, когда работа связана с использованием вредных веществ.

Промышленные роботы позволяют интенсифицировать использование технологического оборудования, повысить сменность его работы, уменьшить дефицит вспомогательного персонала и рабочих основного производства. Робот не утомляется, он практически нечувствителен к условиям труда. Моральное старение промышленных роботов происходит очень медленно, так как при смене объектов производства достаточно заменить простую и недорогую сменную оснастку и программу. Поэтому роботы могут быть многократно использованы.

Роботы можно разделить на три типа (поколения).

Роботы I типа (роботы с обучением) — обладающие способностью запоминать программу по выполнению разнообразных операций, относящихся к сфере деятельности человека; обладающие автономными свойствами и имеющие очень ограниченные возможности по восприятию рабочей среды. Движения осуществляются по жесткой программе.

Роботы II типа (адаптивные роботы) — имеют датчики обратной связи, воспринимающие информацию от окружающей среды. Такие роботы имеют основную программу и подпрограммы, которые выбираются в зависимости от информации, полученной от внешней среды. Следовательно, такие роботы, имеющие ЭВМ или обслуживаемые ЭВМ, обладают «зрением» и «осознанием» и способны «ориентироваться» в окружающей обстановке.

Роботы III типа («интеллектуальные» роботы) — наделены искусственным интеллектом. Для их работы достаточно задать конечную цель работы, т. е.

алгоритм поиска. Такие роботы могут воспринимать и логически оценивать окружающую обстановку и определять движения, необходимые для достижения заданной цели работы. Для управления интеллектуальными роботами требуются средства вычислительной техники.

Роботы I типа с цикловыми, контурными и позиционными системами программного управления успешно применяются для автоматизации загрузки-выгрузки обрабатываемых деталей, а также для выполнения транспортных и вспомогательных операций на металлорежущих станках. Применение этих роботов особенно эффективно на автоматизированных участках и в автоматических линиях из станков с ЧПУ при групповой обработке. Роботы I типа относительно просты, недороги и надежны.

По степени универсальности промышленные роботы делят на три группы:

1) универсальные, предназначенные для выполнения комплекса как основных, так и вспомогательных операций независимо от типа производства с автоматической сменой захватного устройства и обладающие наибольшим числом степеней свободы;

2) специализированные, предназначенные для работы с деталями определенного класса, ограничиваемые видом производства (кузнечное, литейное, механо-сборочное и т. д.) с автоматической сменой захватного устройства и обладающие ограниченным числом степеней свободы;

3) специальные, предназначенные для выполнения работы только с определенными деталями по строго зафиксированной программе и обладающие одной-тремя степенями свободы.

По грузоподъемности их делят на роботы малой (до 50 Н), средней (50—400 Н), большой (более 400 Н) грузоподъемности. Роботы могут иметь гидравлический, пневматический, электрический и комбинированный силовые приводы рабочих органов. По степени конструктивной связи со станком роботы могут быть стационарными, передвижными, подвесными. Они могут работать в декартовой, цилиндрической, сферической и смешанной системах координат.

§ 2. Структура и механизмы роботов. Управление роботами

Структура. Промышленные роботы должны автоматически по определенной программе выполнять заданный цикл перемещений обрабатываемой детали или исполнительного органа. Для выполнения сложных производственных функций робот должен иметь механизм захвата, удерживающий предмет обработки; механизм руки со многими степенями свободы, перемещающий механизм захвата в любое нужное положение в пределах рабочей зоны; устройство позиционирования, предназначенное для перемещения механической руки; управляющую систему или вычислительную машину с устройством памяти, в котором хранится информация о последовательности технологических операций. Чтобы придать роботу необходимую универсальность, позволяющую использовать его для выполнения самых разнообразных операций, его механизмы должны обладать высокой манипуляционной гибкостью. Число

координат, по которым можно перемещать обрабатываемую деталь, определяет число степеней свободы промышленного робота. С увеличением числа степеней свободы возрастает и манипуляционная гибкость робота.

Двигательные возможности механической руки робота определяются ее структурой, видом и последовательностью расположения входящих в нее кинематических пар. На рис. 287 приведены некоторые возможные структурные кинематические схемы механических рук роботов с указанием зоны обслуживания. В пределах этого пространства рука робота может вывести кисть в любую точку. Очевидно, при изменении соотношения между осями кинематических пар размеры и конфигурация рабочего пространства меняются. Поэтому все параметры, влияющие на объем и конфигурацию рабочего пространства, следует устанавливать исходя из особенностей согласования работы робота с конкретным технологическим оборудованием.

Перемещение кисти робота в декартовой системе координат обеспечивается с помощью трех прямолинейных движений (рис. 287, а, б), в цилиндрической системе координат — с помощью двух прямолинейных и одного вращательного движения (рис. 287, в) или двух вращательных и одного прямолинейного движения (рис. 287, г), в сферической системе координат — с помощью двух вращательных и одного прямолинейного движения (рис. 287, д) или трех вращательных движений (рис. 287, е).

Следует отметить, что ориентирующие движения робота обычно обеспечиваются кинематической структурой кисти, перемещающей детали в требуемом положении.

Наибольшее распространение получили структуры рук роботов, приведенные на рис. 287, в, д.

Робот «Versatran» (США) включает подвижную руку 1, которая может выполнять указанные стрелками движения по вертикали, по горизонтали и поворот вокруг оси колонны; кисть 2 с захватом, которая может получить вращение и разворот (рис. 288, а). Вместе с движением захвата рука имеет шесть степеней свободы. Механический блок 3 обеспечивает выполнение операций перемещения руки робота. В осно-

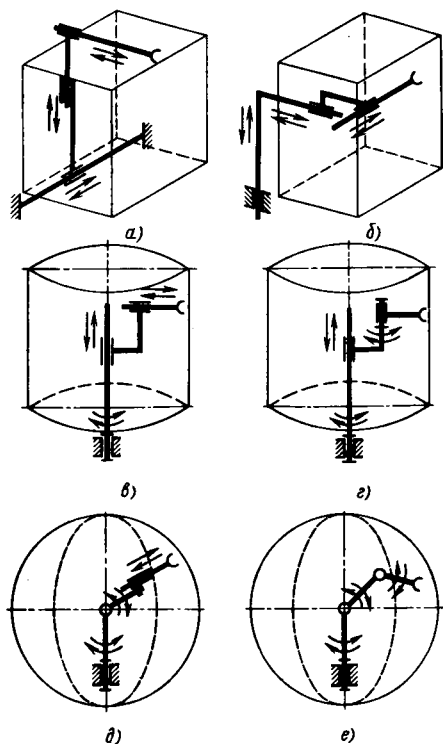


Рис. 287. Структурные кинематические схемы рук роботов

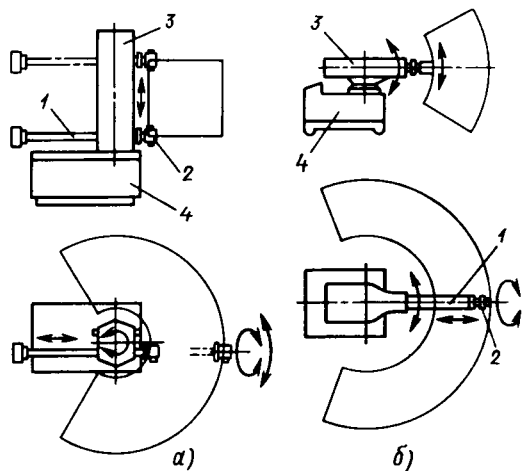


Рис. 288

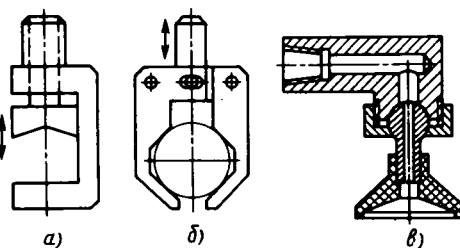


Рис. 289. Типы механизмов захвата:

а — с одной подвижной губкой; б — с двумя подвижными губками; в — вакуумный.

вании 4 расположена гидростанция привода. У робота «Unimate» (США) рука 1 может поворачиваться в вертикальной плоскости, выполнять горизонтальный поворот и продольное перемещение, а кисть 2 с захватом осуществлять разворот и наклон, так что вместе с движением захвата рука робота имеет шесть степеней свободы (рис. 288, б).

Тонкими линиями на рис. 288 показаны рабочие зоны роботов. У робота «Versatran» рабочая зона описывается в цилиндрической системе координат, а у робота «Unimate» — в сферической системе. Анализ существующих конструкций роботов показал, что большинство из них работает в цилиндрической системе координат.

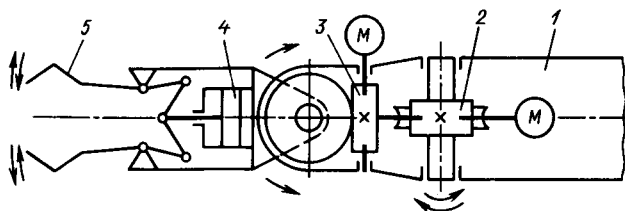
Конструкции исполнительных механизмов роботов (захваты, кисти руки) отличаются большим разнообразием. В них используют червячные, цилиндрические, планетарные, конические зубчатые, реечные, винтовые, цепные, тросовые и ленточные передачи, гидро- и пневмоцилиндры и т. д.

Механизмы захвата. Они предназначены для захвата и удержания детали в процессе перемещения. При их проектировании учитывают форму детали (определяющую конфигурацию губок), свойства (хрупкость, шероховатость поверхности и т. д.), условия протекания технологического процесса (повышенную температуру, взрывоопасность, среду) и особенности применяемой технологической оснастки. Захваты обычно выполняют быстроосменными. При проектировании необходимо учитывать возможность обеспечения требований взаимозаменяемости, жесткости и точности соединения захвата с рукой робота.

Существуют захваты типа крючков, клещей с одной или двумя подвижными губками, с вакуумными или электромагнитными прихватами и др.

Некоторые типы механизмов захвата показаны на рис. 289. В приводе захватов используют гидро- или пневмоцилиндры. Захват закрепляют в кисти руки робота, которая и обеспечивает пространственную ориентацию за-

Рис. 290. Кинематическая схема кисти руки робота



жатой в захвате детали. Кинематическая схема одной из конструкций кисти руки робота показана на рис. 290. Кисть смонтирована на механической руке 1 и имеет два привода 2 и 3, включающих червячные передачи для поворота захвата 5 относительно двух взаимно перпендикулярных осей, а также привод 4 для обеспечения движения зажима губок захвата.

Механизм руки. Рука используется для перемещения кисти с захватом. Она представляет собой консоль и может осуществлять различные пространственные перемещения. Конструкции рук могут быть шарнирными, подобно руке человека, и без сочленений, использующие для перемещений механизм реечной передачи, поршневой цилиндр и т. д. Поворот может быть осуществлен с помощью червячной пары или лопастного гидроцилиндра. В простых моделях роботов рука перемещается с помощью поршневых цилиндров. Примером использования пневмопривода для продольного перемещения руки робота является конструкция руки, показанная на рис. 291. При подаче воздуха в одну из полостей пневмоцилиндра 9 осуществляется перемещение поршня 8 со штоком 10 и кистью 2 в продольном направлении. Поворот кисти 2 производится от пневмоцилиндра, который перемещает рейку 5, сцепленную с зубчатым колесом 6. При этом поворачиваются валы 7 и 11 вместе с пневмоцилиндром 12 и кистью 2 с захватом 1. При подаче воздуха под поршень 4 происходит закрытие захвата, а раскрытие осуществляется под действием пружины 3.

Приводы. Для перемещения исполнительных механизмов роботов применяют электрические, пневматические и

гидравлические приводы. При выборе типа привода необходимо учитывать специфические требования эксплуатации робота, обеспечения надежности его функционирования и заданной точности позиционирования, требования к скорости срабатывания и мертвому ходу при изменении направления движения и т. д.

Электрические приводы (серводвигатели переменного и постоянного тока, шаговые двигатели и др.) обладают следующими преимуществами: простотой обеспечения энергией (по проводам), простотой передачи и суммирования сигналов. Их недостаток — сравнительно большие размеры механизмов.

Пневматические приводы (двигатели, цилиндры и др.) просты в управлении, дешевы, высоконадежны, пожаробезопасны и т. д. Их недостатки — трудность обеспечения постоянной скорости перемещения и точного позиционирования, низкая мощность, необходимость смазки и защиты от коррозии.

Гидравлические приводы (цилиндры, однолопастные гидродвигатели, электрогидравлические шаговые двигатели и др.) легки, компактны, позволяют использовать высокое давление, обладают высокой частотой собственных колебаний. В них возможно простое регулирование давления и расхода, усиление мощности и т. д. Недостатки этих приводов: необходимость в отдельном источнике питания, изменение вязкости масла при изменении температуры, колебание давления вследствие потерь в трубопроводах, необходимость контроля за состоянием трубопроводов и рабочей жидкости и т. д.

Управление роботами. Системы управления промышленными роботами имеют много общего с системами про-

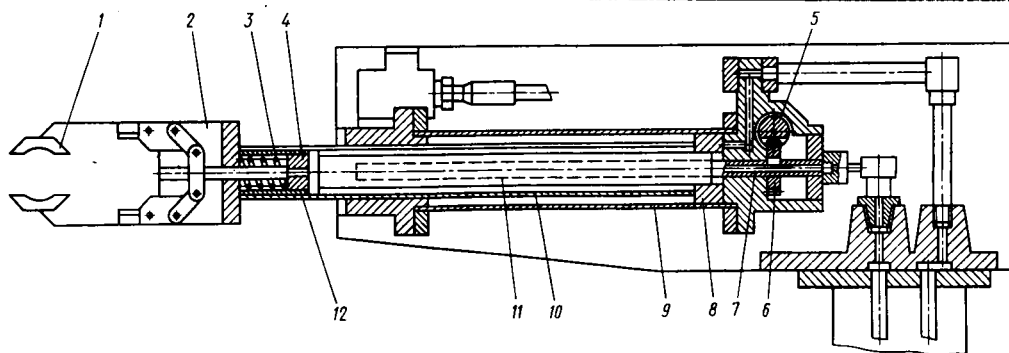


Рис. 291. Конструкция руки робота с пневмоприводом

граммного управления станками. В роботах также используют системы позиционного и контурного управления. Причем они могут быть как аналоговыми, так и цифровыми, что определяется видом устройств сравнения сигналов программы работы робота и сигналов датчиков обратной связи. Роботы I типа (см. гл. 33, § 1) работают по жесткой программе.

При контурном или непрерывном управлении рука робота перемещается по заданной траектории в пределах рабочей зоны обслуживания. При позиционном управлении задают только отдельные точки рабочей зоны, в которые рука робота должна прийти при воспроизведении программы. Системы управления сравнительно простых роботов в основном имеют электронную память; в них используются жесткие упоры, конечные выключатели, штекерные коммутаторные панели, потенциометры и т. д. Более сложные системы имеют электронную память, позволяющую хранить относительно большое число различных программ действия робота. И, наконец, системы, в которых

перерабатывается большой объем информации, требуют управляющих ЭВМ.

В отличие от станков роботы программируют, как правило, методом обучения, когда на первом цикле оператор, управляя роботом вручную на малой скорости, имитирует обслуживание. Вся последовательность действий робота, координаты позиций, траектории перемещения запоминаются и воспроизводятся в последующих циклах автоматически (на рабочих скоростях). Такой метод задания программы обусловлен сложностью цикла обслуживания, трудностями математического программирования систем с большим числом степеней свободы и отсутствием единой технологической базы для функционирования робота и обслуживаемого им оборудования.

§ 3. Конструктивный анализ и расчет роботов

Конструкция консольного передвижного промышленного робота РВ-50Ф2 (ЭНИМС), предназначенного для загрузки станков токарной группы (1А713МФ3), приведена на рис. 292.

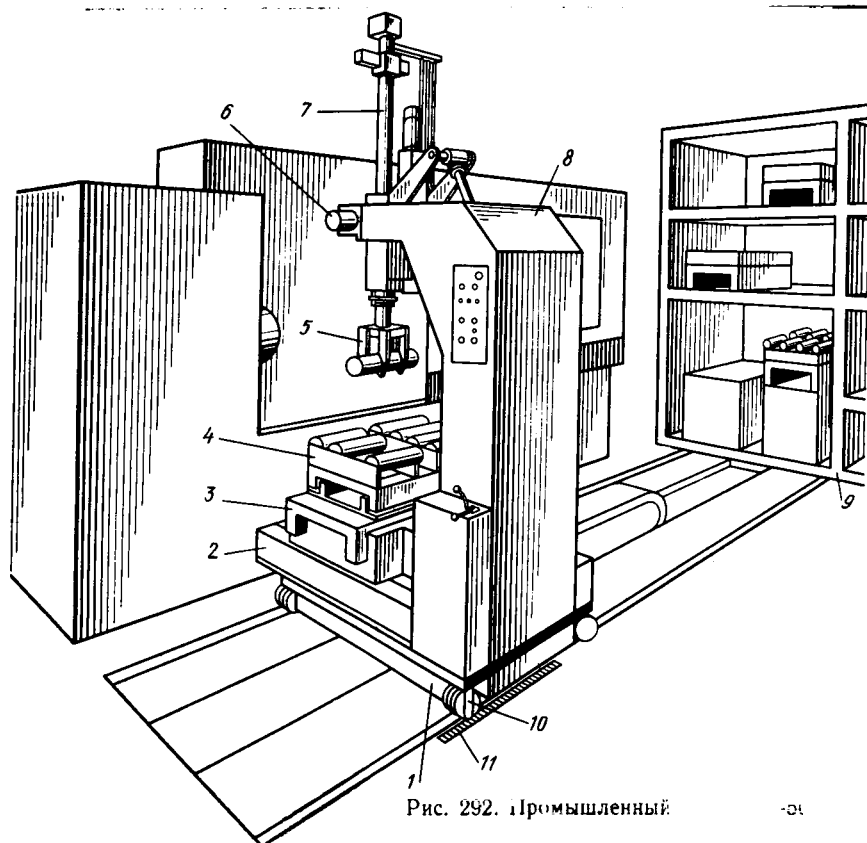


Рис. 292. Промышленный

Технические характеристики промышленных роботов

Модель	Число степеней свободы	Перемещение руки				Скорость перемещения			Грузоподъемность, Н	Точность позиционирования, мм
		горизонтальное, мм	вертикальное, мм	вокруг вертикальной оси, °	вокруг горизонтальной оси, °	поступательного, м/с		вращательного, 1/с		
						горизонтального	вертикального			
СМ40Ц4301	4	40	500	—	90	0,5	0,5	60	400	±0,1
УПК-1	5	770	770	240	—	0,5	0,5	30	400	±2
ПР-35	5	1067	2300	220	—	0,762	1,27	110	350	±1,25
PB-50	4	50	300	—	70	0,5	0,5	60	500	±0,7
«Versatran» (США)	5	770	770	240	—	0,914	0,914	90	680	±0,76
«Unimate» (США)	5	1070	—	220	60	1,27	1,27	110	340	±1,27
«FANUC» (Япония)	5	1100	1400	300	—	0,5	0,5	120	200	±1

На колесном основании 1 робота расположены двухкоординатный крестовый стол 2 и колонна 8. На колонне смонтирована рука 7 со сменными захватами 5. На крестовом столе установлено приспособление 3, обеспечивающее базирование и установку специальной тары 4 с упорядоченно расположенными заготовками. Положение робота у станка определяется механизмом 10, подвижный штырь которого входит в зацепление с фиксирующей рейкой 11, установленной рядом с рельсовым путем. Робот может перемещаться по рельсовому пути вдоль станка к автоматизированному складу 9. Он имеет пять степеней свободы (без учета движения захвата и перемещения по рельсовому пути). Продольное и поперечное перемещение крестового стола, а также ход руки робота вдоль своей продольной оси осуществляется посредством системы ЧПУ; привод этих движений производится от электрогидравлических шаговых двигателей. Качание руки вдоль оси 6, ротация захвата (поворот вокруг продольной оси руки) и зажим обеспечиваются гидроцилиндрами посредством цикловой автоматики. Перемещение робота по рельсовому пути осуществляется от гидромотора по сигналам конечных выключателей.

Для управления роботом можно использовать любую из станочных серийных систем ЧПУ с программированием трех координат или ЭВМ.

В табл. 22 приведены технические характеристики некоторых промышленных роботов.

Технологические процессы и оборудование разрабатывают с учетом возможностей человека. Роботы превосходят человека по скорости движений, грузоподъемности, они могут работать в значительно более тяжелых условиях, однако уступают человеку в универсальности и способности к адаптации. Поэтому для успешного внедрения в производство промышленных роботов необходимо проведение ряда мероприятий: вносить изменения в технологическое оборудование, обслуживаемое роботами; разрабатывать вспомогательные устройства, расширяющие функции роботов, транспортные системы, выбирая оптимальную компоновку участка станков; устанавливать характер связей указанного участка с основным производством.

Пример компоновки участка из пяти станков с ЧПУ, обслуживаемых одним роботом марки «FANUC», показан на рис. 293. Станки расположены по кругу. Робот может подавать детали от станка к станку или на стол заготовок, а также производить замену инструмента. Рука робота «FANUC» имеет пять степеней свободы без учета движения схвата и может поднимать детали массой до 20 кг.

При создании новых конструкций промышленных роботов определенного технологического назначения необходимо определить степень их универсальности (специальный, специализированный или универсальный), так как это оказывает существенное влияние на конструктивную сложность робота. Далее, исходя из размеров пространства,

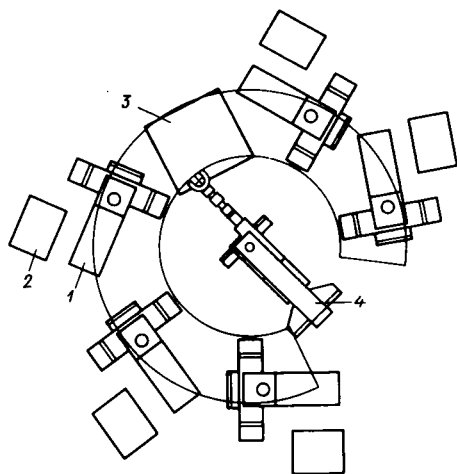


Рис. 293. Компоновка участка станков с ЧПУ, обслуживаемых роботом «FANUC» (Япония): 1 — станок; 2 — система ЧПУ; 3 — стол для заготовок; 4 — робот

которое должен обслуживать робот, необходимо выбрать его кинематическую структурную схему и назначить величины горизонтальных и вертикальных перемещений и углов поворота руки.

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на конструктивные и технические характеристики промышленных роботов, является требуемая точность позиционирования. Конструкция роботов представляет собой пространственно-незамкнутые стержневые системы с высокой кинематической подвижностью. Захваты роботов обычно расположены консольно, поэтому с увеличением вылета руки увеличивается амплитуда колебания захвата из-за изгиба руки, что снижает точность и увеличивает затраты времени на позиционирование. На точность позиционирования оказывают большое влияние размеры и масса перемещаемой детали, величины перемещений, скорости и ускорения и др.

В начале проектирования промышленного робота определяют допустимые скорости перемещения детали при получении заданной точности позиционирования, а затем выбирают тип привода и конструктивные параметры всех механизмов, производят их расчет и расчет жесткости и динамической устойчивости разработанной конструкции робота.

Для определения скорости линейного позиционирования в диапазоне перемещений $L_x = 0,4 \div 1,2$ м (L_x — вылет консоли руки робота) может быть использована эмпирическая формула [37]

$$v_{x, \text{расч}} = \frac{1,4 \sqrt[3]{L_x^4 \Delta l}}{\sqrt[3]{G_{\text{дет}}}},$$

где Δl — погрешность позиционирования, мм; $G_{\text{дет}}$ — вес объекта манипулирования, Н.

При меньших величинах перемещений $\Delta x = 0,05 \div 0,8$ м и при работе без упоров может быть принята линейная зависимость $v_{x, \text{расч}}$ от Δx :

$$v_{x, \text{расч}} = \frac{2L_x \sqrt[3]{\Delta l}}{\sqrt[3]{G_{\text{дет}}}}.$$

В интервале $L_x = 0,4 \div 0,8$ м при расчете $v_{x, \text{расч}}$ обе формулы дают близкие величины скоростей. С дальнейшим увеличением L_x возможности увеличения $v_{x, \text{расч}}$ уменьшаются, и при $L_x = 0,8 \div 2$ м $v_{x, \text{расч}} = \frac{1,6L_x \sqrt[3]{\Delta l}}{\sqrt[3]{G_{\text{дет}}}}$.

При больших L_x необходимо уменьшать $v_{x, \text{расч}}$ по сравнению с рассчитанной.

Скорость вертикального перемещения руки обычно неодинакова при движении вверх и вниз. Однако при правильном уравнивании масс эти отличия меньше, и скорость можно рассчитывать по формуле

$$v_z \text{ расч} = \frac{a_z \sqrt[3]{L_z^4 \Delta l}}{\sqrt[3]{G}},$$

где a_z — коэффициент, зависящий от конструкции привода, при гидравлическом приводе $a_z = 3$; L_z — путь при вертикальном перемещении, м; G — вес перемещаемого элемента и детали, Н.

Для определения допустимой быстроходности устройств поворота всей руки относительно вертикальной оси может быть использована эмпирическая формула

$$\omega_{\text{сп}} = \frac{0,5 \sqrt[3]{\Psi^4 \delta}}{\sqrt[3]{(2L_x)^4}},$$

где Ψ — угол поворота руки, рад.; δ — погрешность углового позиционирования, ''.

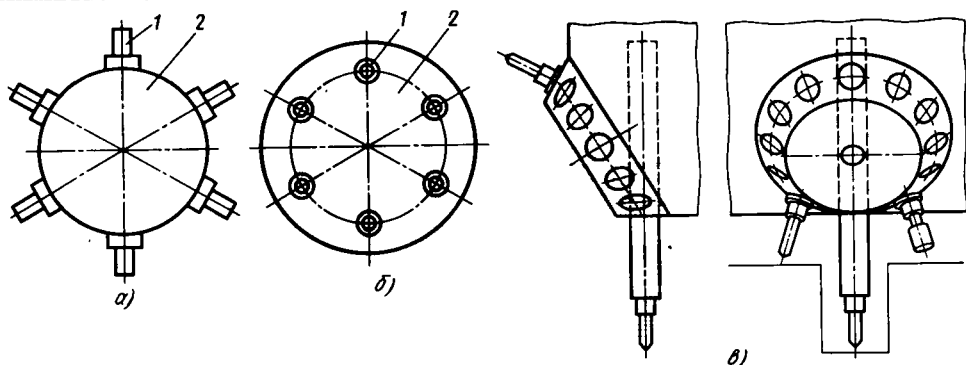


Рис. 294. Накопители инструментов револьверного типа

Особое внимание при проектировании следует обращать на механизмы углового позиционирования. Там, где возможно по условиям компоновки, предпочтение следует отдавать механизмам линейного позиционирования, отличающимся большой быстроходностью. При расчете роботов на жесткость и динамическую устойчивость конструкции робота рассматривают как стержневую систему, нагруженную массой транспортируемой детали [15].

Теоретические, экспериментальные и опытно-конструкторские работы показали, что во многих технологических операциях машиностроительного производства могут эффективно применяться роботы, которые позволяют осуществлять автоматизацию практически всех технологических процессов.

Использование промышленных роботов позволяет не только повысить уровень автоматизации в машиностроении, но и эффективней использовать оборудование и на этой основе значительно увеличить производительность труда и сократить численность рабочих.

§ 4. Системы автоматической смены инструментов

Характерной особенностью многооперационных станков с ЧПУ является наличие у них устройств автоматической смены инструментов, основная цель которых — сокращение времени простоя станков, затрачиваемого на смену инструмента. Наиболее развитые устройства автоматической смены инструментов включают накопители инструментов (револьверные головки, мага-

зины шпиндельных гильз, инструментальные магазины); загрузочно-разгрузочные устройства для съема и установки инструмента в шпиндель станка (инструментальные загрузочные автооператоры); промежуточные конвейерные устройства для передачи инструмента от накопителя к загрузочно-разгрузочному устройству при больших расстояниях от шпинделя до накопителя (автооператоры, перегружатели); промежуточные накопители позиций, являющиеся местом замены инструмента при больших расстояниях накопителя (магазина) от шпинделя и больших емкостях магазина.

При использовании системы автоматической смены инструментов вращающийся инструмент обычно устанавливают в специальных патронах или оправках, которые должны обеспечивать возможность закрепления различных инструментов с высокой точностью и при этом иметь специальные устройства, позволяющие программировать автоматическую смену инструмента.

Револьверные инструментальные головки. Револьверная инструментальная головка представляет собой несколько инструментальных шпинделей, смонтированных в общем поворотном корпусе. Инструменты во время настройки станка закрепляют в шпинделях, и их смена при обработке осуществляется индексацией корпуса головки. Смена инструмента с помощью револьверной головки осуществляется просто и с минимальным временем (2—3 с).

Используются револьверные головки, в которых оси инструментов 1 (рис. 294, а) располагаются перпендикулярно или параллельно (рис. 294, б) оси голов-

ки 2. В некоторых станках применяют револьверные головки с расположением осей инструментов под углом к оси головки (рис. 294, в). При применении револьверных головок не требуется использовать загрузочно-разгрузочные и конвейерные устройства, а также промежуточные накопители.

Недостатки револьверных инструментальных (шпиндельных) головок: ограниченность числа инструментов (шесть-восемь шпинделей), ограниченность рабочей зоны инструментов (соседние инструменты препятствуют увеличению рабочего хода), недостаточная жесткость и точность сравнительно коротких шпинделей, размещенных в головке.

Револьверные инструментальные головки наиболее часто применяют на станках токарной группы.

На рис. 294, в показан магазин инструментов револьверного типа, в гнезда которого в специальных оправках установлены инструменты. Магазин инструментов расположен на шпиндельной бабке таким образом, что в одной из позиций оправка с инструментом оказывается соосной со шпинделем станка. При выдвижении шпинделя оправка захватывается им, выносится из магазина, и инструмент вступает в работу. При возврате шпинделя оправка с инструментом отсоединяется от шпинделя и закрепляется в магазине. Для смены инструментов магазин поворачивается и перемещает новую оправку с инструментом в положение, соосное со шпинделем станка.

В револьверных магазинах такого типа может быть установлено 12—16 инструментов, шпиндель выполняется достаточно жестким. Время смены инструмента не более 5 с.

Магазины шпиндельных гильз. В позициях магазина размещают не инструменты, а шпиндельные гильзы с установленными в них инструментами, настроенными на размер. Магазин шпиндельных гильз обычно размещают на шпиндельной бабке. Он может быть барабанного или линейного типа. Требуемая по программе шпиндельная гильза (рис. 295) после поворота магазина 1 подается на рабочую позицию, где фиксируется. При этом шпиндель 2 соединяется с приводом главного движения 4 посредством муфты 3, а гильза — с приводом подачи. Позициониро-

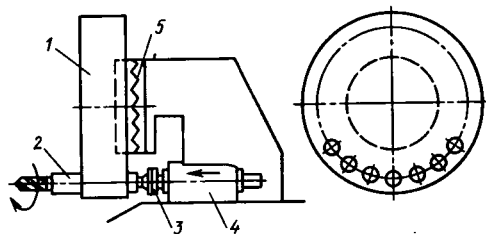


Рис. 295. Магазин шпиндельных гильз

вание магазина осуществляется с помощью зубчатой муфты 5.

Магазины шпиндельных гильз не получили широкого распространения вследствие повышенной стоимости устройства и снижения точности из-за частых смен шпиндельных гильз при обработке.

Инструментальные магазины. Инструменты устанавливают в магазины в специальных оправках. Инструментальные магазины выполняют в виде отдельных механизмов для хранения необходимого числа инструментов (до 100 и более). В соответствии с программой обработки инструменты автоматически выбираются из магазина и загружаются в шпиндель станка. Исползованные инструменты автоматически возвращаются в магазин. Существуют три типа инструментальных магазинов: поворотные, цепные и стеллажные. Инструментальные магазины могут располагаться на шпиндельной бабке, на колонне или станине, на столе станка или вне станка в зависимости от его компоновки (рис. 296).

Наибольшее распространение получили магазины дискового и барабанного типа (рис. 296, а—д). Магазины цепного типа (рис. 296, ж) позволяют свободно изменять его емкость при высокой компактности и без существенного изменения конструкции станка. Многосекционные магазины (рис. 296, е), обладающие большой емкостью, позволяют использовать в работе станка одну из секций магазина без перемещения всего запаса инструментов.

При расположении магазина на шпиндельной бабке (рис. 296, а) не требуется дополнительной координации положения магазина и шпинделя при смене инструмента загрузочным автооператором. Цикл работы автооперато-

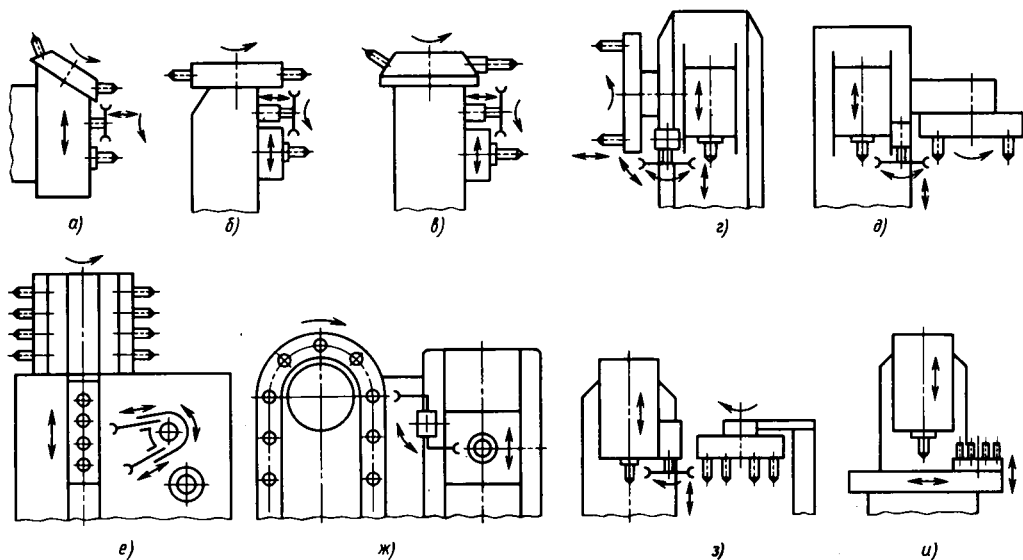


Рис. 296. Компоновка инструментальных магазинов

ра наиболее простой. Однако расположение магазина на шпиндельной бабке увеличивает ее габаритные размеры и массу, что отрицательно влияет на точность обработки. При расположении магазина на станине (рис. 296, б—д) шпиндельная бабка разгружается, но цикл смены инструмента усложняется. При каждой смене инструмента шпиндельная бабка должна дополнительно перемещаться из рабочего положения в положение для смены инструмента и обратно. При установке магазина на стойке, расположенной рядом со станком (рис. 296, з), динамические нагрузки магазина не влияют на точность работы станка. Однако увеличиваются габаритные размеры станка, а следовательно, и необходимая площадь для его установки.

Магазины стеллажного типа обычно устанавливают на столе станка (рис. 296, и). В данном случае для поиска инструмента используют системы позиционирования. Недостатком магазинов этого типа является увеличение размеров стола. Многооперационные станки с инструментальными магазинами оснащаются автооператорами, которые в зависимости от выполняемых функций делят на загрузочные и транспортные. Загрузочные автооператоры осуществляют непосредственную смену инструмента в шпинделе станка, тран-

спортные — доставку инструментов от магазина к загрузочному автооператору и обратно. Загрузочные автооператоры делят на одно-, двух- и многозахватные. Зажим инструментальных оправок осуществляется в радиальном направлении за шейку оправок механизмами захвата с подпружиненным поджимом (рис. 297, а) или механизмами клещевого типа (рис. 297, б).

Наиболее широкое применение получили загрузочные двухзахватные автооператоры с вращательным движением захватов (рис. 298). Во время работы станка магазин 1 устанавливается в положение, в котором последующий инструмент поступает в позицию разгрузки-загрузки (рис. 298, а). После окончания работы предыдущего инструмента шпиндель возвращается в поло-

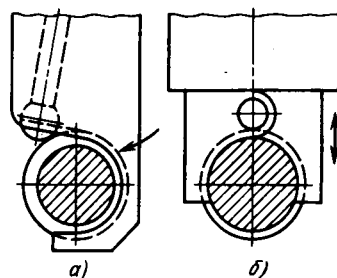


Рис. 297. Механизмы захвата

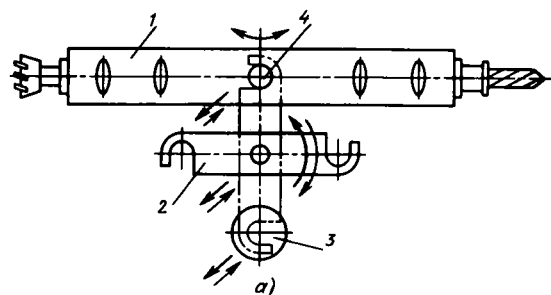
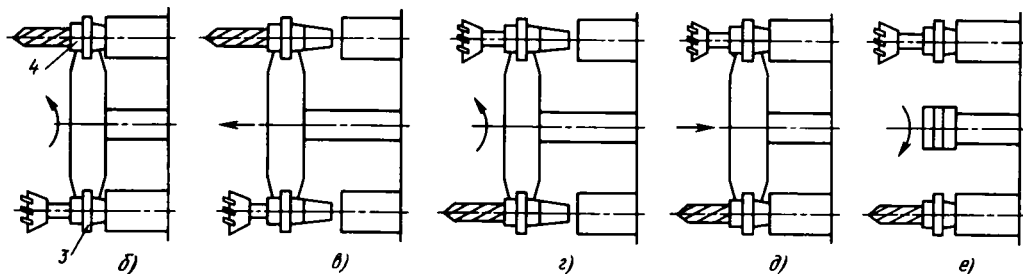


Рис. 298. Двухзахватный автооператор



жение разгрузки-загрузки. Автооператор 2 поворачивается и двумя захватами одновременно захватывает предыдущий 3 и последующий 4 инструменты (рис. 298, б). Механизм зажима освобождает оправку в шпинделе, и автооператор перемещается в осевом направлении, извлекая предыдущий инструмент из шпинделя, а последующий из магазина (рис. 298, в). Далее автооператор поворачивается на 180° , меняя местами предыдущий и последующие инструменты (рис. 298, г), и, перемещаясь в осевом направлении, устанавливает последующий инструмент в шпиндель, а предыдущий — в гнездо магазина (рис. 298, д, е). Механизм зажима

закрепляет новую оправку в шпиндель, а автооператор поворачивается в исходное положение. Весь цикл смены инструментов совершается за 5—6 с.

Выбор конструктивной схемы и проектирование системы автоматической смены инструментов производится в зависимости от назначения и компоновки станка. При этом к системам автоматической смены инструментов предъявляются следующие требования: минимальное время на смену инструмента, достаточная емкость накопителя инструментов, компактность и небольшая потребная площадь, долговечность и высокая надежность работы.

Глава 34 Механизмы зажима обрабатываемых деталей

§ 1. Классификация зажимных механизмов

Зажимные механизмы предназначены для закрепления обрабатываемых деталей в рабочих позициях станков и автоматических линий и должны обеспечивать постоянство их положения при обработке.

Конструкция зажимных механизмов зависит от типа детали и от принятого технологического процесса обработки.

Применяют две группы зажимных механизмов: 1) для зажима деталей симметричного профиля (прутки, трубы, штучные заготовки); 2) для зажима изделий произвольной формы (корпусные детали, кронштейны, плиты и т. д.).

Зажим обрабатываемых деталей осуществляется зажимными органами (цангами, кулачками, мембранами, рычагами и т. д.), перемещение которых для создания необходимой силы зажима производится специальными приводами.

По источнику, создающему силу зажима, все механизмы делят на механизмы с силовым и жестким замыканием. При силовом замыкании сила зажима создается за счет внешних сил — пневмо- и гидроустройствами, пружинами, грузами и т. д., а при жестком замыкании — за счет деформации передаточным и зажимного звеньев. В первом случае сила зажима заготовок лишь в малой степени зависит от колебаний размеров зажимаемой детали, во втором — напряжения в звеньях уже в значительной степени зависят от ее точности. Тип зажимного органа и источник, создающий силы зажима обычно независимы, так как их выбирают исходя из разных условий, поэтому, например, цанговые механизмы зажима могут приводиться в действие вручную, пружинной, пневмоцилиндром (силовое замыкание) или за счет деформирования передаточной системы (жесткое замыкание). В зависимости от степени автоматизации станка (универсальный, полуавтомат, автомат) существуют следующие системы зажима: ручная, полуавтоматическая и автоматическая.

Проектирование новых механизмов зажима является сложной проблемой, так как они определяют не только точность обработки, но и производительность и надежность работы автомата и автоматической линии.

Механизмы зажима должны обеспечивать следующие основные требования: надежность зажима (возникающие силы при обработке не должны изменять первоначально заданное положение обрабатываемой детали); концентрация зажима симметричных профилей независимо от колебаний размеров заготовки; стабильность зажима заготовок по длине; достаточную жесткость зажима, устраняющую возможность возникновения вибраций при обработке; высокую надежность и долговечность в работе; конструктивную простоту и малые габаритные размеры.

§ 2. Конструкции механизмов зажима

Механизмы зажима состоят из зажимного органа (цанги, кулачки, оправки, захваты и т. д.), приводного звена, создающего силу зажима (гидро- и пневмоцилиндр, пружина, механичес-

кий привод и т. д.), и передаточных звеньев (рычаги, трубы и т. д.).

Наибольшее распространение в автоматах для зажима деталей симметричного профиля получили цанговые зажимные механизмы. Одной из характерных особенностей цанговых зажимных механизмов является широкий диапазон размеров закрепляемых заготовок.

Зажимная цанга (рис. 299, б) представляет собой стальную закаленную втулку с прорезанными шлицами, которые образуют пружинящие лепестки цанги. Концы этих лепестков выполнены в виде губок, представляющих собой шлифованный конус (обращенный в ту или другую сторону) — снаружи, и поверхность, по форме повторяющую профиль прутка — внутри. Обычно применяют прутки с круглым, шестигранным и квадратным сечением, и цанги имеют губки соответствующей конфигурации (рис. 299, в).

Число шлицев (и соответственно губок) в цангах обычно равно трем, реже четырем. Трехлепестковые цанги обеспечивают прилегание цанги к прутку в трех точках (по трем лепесткам). В четырех лепестковых цангах распределение сил между отдельными лепестками неопределенно, однако цанги этого типа более просты в изготовлении.

На рис. 300 приведены цанговые механизмы зажима трех типов.

Тип I (рис. 300, а): цанга 1 имеет прямой конус, и для зажима прутка необходимо создать силу, сжимающую цангу. При зажиме прутка зажимная труба 3 перемещает зажимную цангу 1 вправо и за счет конусной расточки гайки 4, навинченной на шпиндель 2, ее лепестки сжимаются.

Тип II (рис. 300, б): цанга 1 имеет обратный конус, и для зажима прутка необходимо создавать силу, растягивающую цангу. Зажим прутка производится перемещением зажимной трубы 3 влево вместе с цангой 2. Цанга с зажимной трубой соединена резьбовым соединением.

Тип III (рис. 300, в): цанга 1 имеет обратный конус, но в отличие от предыдущих вариантов она упирается в шпиндель 2 не конусом, а передней частью лепестков. Для зажима прутка цангой на нее находит стакан 3, к которому прикладывается сила зажима

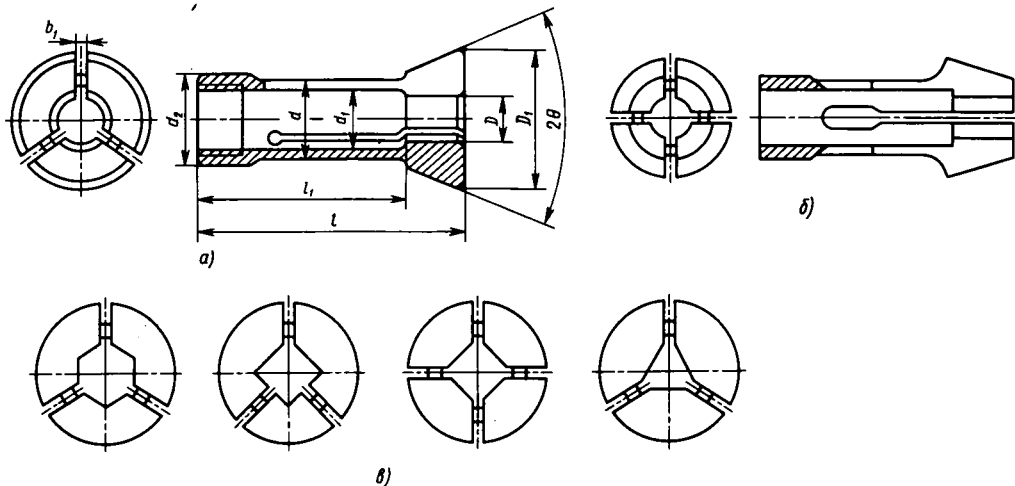


Рис. 299. Зажимные цанги:

D — диаметр расточки губок цанги; D_1 — наружный диаметр конуса цанги; θ — угол конуса цанги; l — общая длина цанги; l_1 — длина цилиндрической части цанги; d , d_1 — наружный и внутренний диаметры цилиндрической части цанги

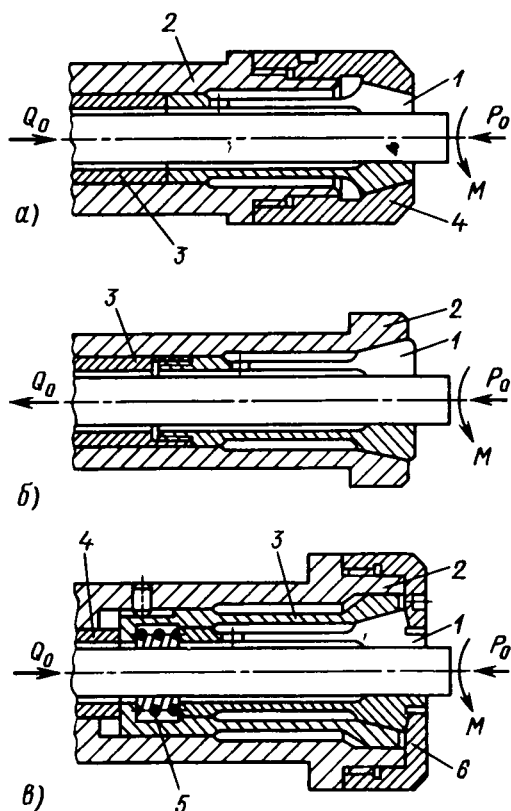


Рис. 300. Типы цанговых механизмов:

P_0 — суммарная осевая сила, действующая на обрабатываемый материал от резцов и осевого инструмента; M — крутящий момент от осевого инструмента; Q_0 — сила зажима, приложенная к зажимной трубе

Q_0 . При разжипе прутка зажимная труба 4 и стакан 3 (от пружины 5) отходят влево, при этом цанга 1 остается прижатой к гайке 6.

Анализ конструкций цанговых механизмов показывает, что наиболее полно отвечает требованиям, предъявляемым к зажимным механизмам, III тип, который обеспечивает высокую надежность и точность зажима по диаметру и длине. Однако эта конструкция сложна и имеет большие размеры.

II тип цанговых механизмов, имея малые размеры, обеспечивает высокую надежность и точность зажима по диаметру, но не гарантирует точность зажима по длине и имеет слабое место — резьбовое соединение цанги и зажимной трубы. I тип механизмов конструктивно прост, но не гарантирует надежность зажима (сила резания уменьшает силу зажима) и точность установки по диаметру и длине. В многшпиндельных токарных автоматах применяются цанговые механизмы II типа, в одношпиндельном — III типа.

§ 3. Выбор привода и расчет механизмов зажима

Привод зажимных звеньев механизмов зажима может осуществляться различными способами с использованием механических, пневматических, гидравлических и других систем. Тип привода

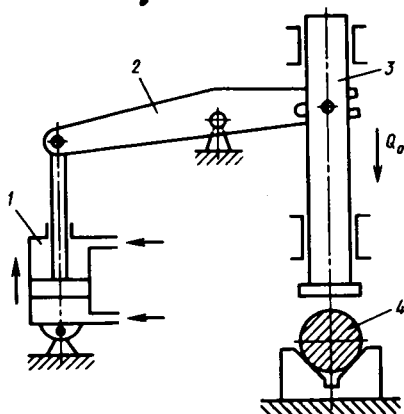


Рис. 301. Принципиальная схема механизма с силовым замыканием:

1 — источник силы зажима Q_0 (пружина, груз и т. д.); 2 — промежуточное звено; 3 — ведомое звено; 4 — заготовка

выбирают из условий надежности зажима, долговечности работы механизма и характеристик зажимаемой заготовки (допуск на размер, форма, жесткость и т. д.).

Принципиальная схема механизма зажима с силовым замыканием показана на рис. 301. При данной системе зажима разброс размеров заготовок в пределах допуска серьезного значения не имеет, так как это влияет только на незначительное изменение силы зажима. Механизмы с силовым замыканием применяют, например, при зажиме некалиброванных прутков на многошпиндельных токарных автоматах.

При выборе привода зажимного ме-

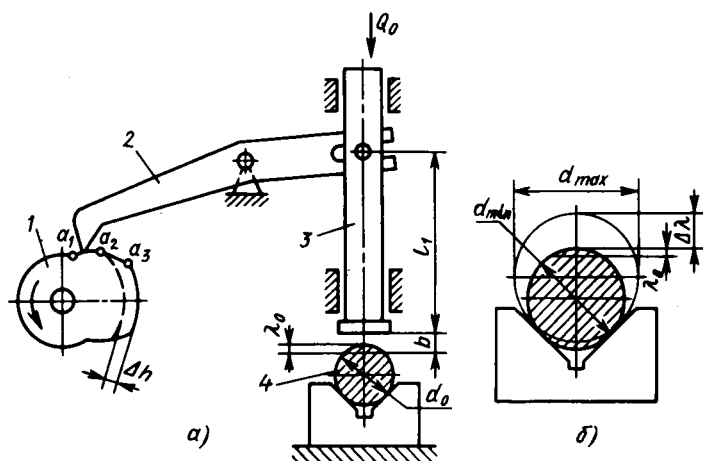
ханизма учитывают, что в пневматических приводах обычно используют сжатый воздух из централизованной пневмосети. Однако из-за малых давлений в пневмосети (0,3—0,5 МПа) габаритные размеры и масса пневматических приводов относительно велики. Гидравлические приводы более компактны, развивают большие силы зажима, так как давление в гидросистемах достигает 6—7 МПа и более.

Механизмы с жестким замыканием кинематической цепи применяют в тех случаях, когда необходимы большие силы зажима заготовок при максимальной компактности механизма.

Принципиальная схема механизма с жестким замыканием показана на рис. 302, а. Ведущим звеном является кулачок 1, который, действуя через промежуточное звено 2 и ведомое звено 3, создает силу Q_0 , возникающую между ведомым звеном 3 и жестким звеном 4 (деталь).

Работа механизма происходит следующим образом. При вращении кулачка 1, начиная с точки a_1 , звенья 2 и 3 начинают перемещаться, пока ведомое звено 3 не встретит препятствие — жесткое звено 4. Если бы жесткого звена 4 не было, звено 3 переместилось на величину b . Однако после наступления контакта между жестким и ведомыми звеньями, что соответствует точке a_2 на кулачке, происходит жесткое замыкание всех звеньев, при дальнейшем вращении кулачка от точки a_2 до точки a_3 происходит деформация звеньев 2, 3, т. е. жесткое замыка-

Рис. 302. Принципиальная схема механизма с жестким замыканием



ние кинематической цепи механизма. Если размер жесткого звена 4 колеблется в некоторых пределах, то происходят соответствующие изменения деформаций и напряжений звеньев, так как ход ведущего звена (кулачка) остается постоянным и равным h , а ход, на котором происходит создание силы, Δh , зависит от величины d_0 — диаметра зажимаемой детали. При жестком замыкании звенья, входящие в механизм, могут работать на растяжение или сжатие, на изгиб или кручение.

Рассмотрим расчет механизма с жестким замыканием, когда ведомое звено подвергается растяжению или сжатию при зажиме заготовки (рис. 302, б).

При силе зажима Q_0 , когда заготовка имеет минимальный диаметр $d_{\min}$, деформация ведомого звена при растяжении или сжатии

$$\lambda_0 = \frac{Q_0 l_1}{EF}, \quad (232)$$

где l_1 — длина ведомого звена; F — площадь сечения звена, работающего на растяжение или сжатие; E — модуль упругости.

Однако при зажиме ($Q_{\max}$) заготовки наибольшим диаметром ($d_{\max}$) момент жесткого контакта наступит раньше, и при дальнейшем движении ведущего звена в механизме возникнут силы значительно большие. Максимальная деформация ведомого звена $\lambda_{\max}$ при зажиме заготовки наибольшего диаметра (рис. 302, б).

$$\lambda_{\max} = \lambda_0 + \Delta\lambda, \quad (233)$$

где $\Delta\lambda$ — дополнительное приращение деформации ведомого звена из-за колебаний размеров жесткого звена (заготовки).

Известно, что величина деформации пропорциональна действующей силе (закон Гука), тогда

$$\frac{Q_{\max}}{Q_0} = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_0} = K, \quad (234)$$

где K — коэффициент возрастания силы.

Тогда из уравнений (233) и (234) получим

$$\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_0 = \lambda_0 (K - 1)$$

или, подставляя в формулу значение λ_0 из уравнения (232), будем иметь

$$\Delta\lambda = \frac{Q_0 l_1}{EF} (K - 1). \quad (235)$$

Аналогично можно вывести зависимости для приращения деформаций при зажиме заготовки с максимальными размерами для звеньев, работающих на изгиб или кручение.

При расчете механизма зажима с жестким замыканием определяют суммарную величину приращения деформаций всех звеньев цепи (с учетом передаточных отношений), задаваясь коэффициентом возрастания силы в пределах $K = 3 \div 4$, и сравнивают ее с величиной колебаний размера Δ жесткого звена (заготовки). При $\Delta\lambda_{\text{сум}} > \Delta$ (где $\Delta\lambda_{\text{сум}}$ — сумма деформаций звеньев, входящих в механизм) механизм будет работать нормально, а при $\Delta > \Delta\lambda_{\text{сум}}$ возможны поломки слабого звена. Однако при жестком замыкании увеличением прочности слабого звена нельзя обеспечить работоспособность механизма. Увеличение прочности звена за счет увеличения размеров связано с увеличением и его жесткости, т. е. уменьшением его деформации, что приводит к еще большему возрастанию сил в цепи и, следовательно, к выходу из строя другого звена.

Расчеты механизмов зажима с силовым и жестким замыканием имеют свои особенности, но методика расчета единая. При расчете определяют силы, с которыми зажимные звенья должны удерживать обрабатываемую деталь, определяют параметры привода, обеспечивающего данную силу зажима.

Основные этапы расчета зажимных механизмов рассмотрим на примере цангового зажимного механизма (рис. 303). При зажиме обрабатываемой

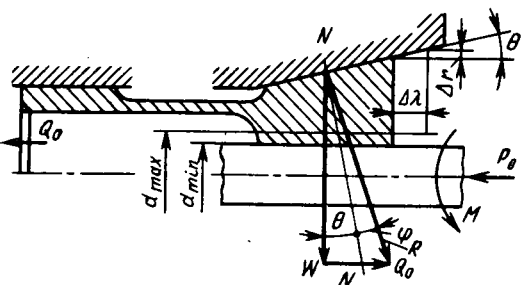


Рис. 303. Расчетная схема цангового механизма зажима:

$d_{\max}$, $d_{\min}$ — максимальный и минимальный диаметры зажимного прутка; R — реакция сил, действующих на цангу при зажиме заготовки; N — нормаль к конусной поверхности цанги; $\Delta r = r_{\max} - r_{\min}$ — разность между максимальным и минимальным радиусами зажимаемого прутка

мой детали все звенья механизма — цанга, труба, рычажки, упорные гайки и сам шпиндель — находятся под нагрузкой. Зная технологические операции, выполняемые на данном шпинделе, можно определить силу, которую должен обеспечивать зажимной механизм.

1. Определение суммарной окружной силы P , действующей на поверхности детали в цанге:

$$P = \sum_{i=1}^{i=n} P_i \frac{r_i}{r} + \frac{M}{r},$$

где $\sum P_i \frac{r_i}{r}$ — сумма сил резания, приведенная к наружному диаметру прутка; r_i — радиус приложения силы резания P_i ; r — радиус прутка; M — крутящий момент от осевого инструмента; n — число резцов, участвующих в обработке.

2. Определение результирующей силы P_p , которая стремится повернуть деталь в цанге:

$$P_p = \sqrt{P^2 + P_0^2},$$

где P_0 — суммарная осевая сила, возникающая при работе резцами и осевым инструментом.

3. Определение необходимой силы W сжатия лепестков цанги:

$$W \mu_1 > P_p,$$

где $W \mu_1$ — окружная сила, передаваемая зажимной цангой; μ_1 — коэффициент трения между материалом и цангой, $\mu_1 = 0,25$ для гладких губок, $\mu_1 = 0,45 \div 0,5$ для губки с насечкой крест-накрест. Тогда величина силы сжатия лепестков цанги

$$W = \frac{m P_p}{\mu_1},$$

где m — коэффициент запаса силы зажима, $m = 1,2 \div 1,5$.

4. Определение силы тяги Q_0 , которую необходимо приложить к зажимной трубе, чтобы обеспечить зажим обрабатываемой детали.

Для цанг II типа (смотри треугольник сил на рис. 303)

$$Q_0 = W \operatorname{tg}(\theta + \varphi),$$

где θ — половина угла конуса цанги, $\theta = 12 \div 15^\circ$; φ — угол трения между цангой и шпинделем; $\mu_2 = \operatorname{tg} \varphi$ — коэф-

фициент трения между цангой и шпинделем, для шлифованных поверхностей цанги и шпинделя принимают $\mu_2 \leq 0,2$.

Дальнейшие этапы расчета зависят от характера замыкания механизма (силовое или жесткое). При силовом замыкании сила Q_0 является исходной для определения параметров всего механизма зажима (цанги, трубы, резьбы, рычагов и т. д.). Исходя из этого условия подбирают необходимые параметры источника силы зажима (диаметр пневмо- или гидроцилиндра, диаметр проволоки пружины и т. д.). Основой расчета зажимных механизмов с приводом от механизмов с жестким замыканием является оценка колебаний размеров обрабатываемой детали, а следовательно, сил зажима.

5. Составление принципиальной схемы механизма с указанием габаритных размеров всех звеньев (из конструктивных соображений) и выбор материала звеньев.

6. Определение суммарной величины деформации упругой системы под действием силы Q_0 :

$$\lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots,$$

где λ_1 ; λ_2 ; $\lambda_3 \dots$ — деформации цанги, зажимной трубы, собачек и т. д.

7. Определение величины приращения деформации упругой системы при зажиме заготовок с максимальными размерами:

$$\Delta \lambda = \lambda_{\max} - \lambda_0 = \lambda_0 (K - 1).$$

Используя рис. 303 можно записать $\frac{\Delta r}{\Delta \lambda} = \operatorname{tg} \theta$, а $\Delta d = 2 \Delta r$. Тогда зависимость между допуском Δd на диаметр прутка, деформацией звеньев и коэффициентом возрастания сил, принимающим максимальное значение, $K = K_{\max}$ имеет вид:

$$\Delta d_{\max} = 2 \lambda_0 (K_{\max} - 1) \operatorname{tg} \theta. \quad (236)$$

Если допуск на размер обрабатываемого прутка $\delta < \Delta d_{\max}$, то механизм работоспособен, все размеры выбраны правильно; если $\delta > \Delta d_{\max}$, то в механизме возможны поломки и необходимо менять его конструктивные размеры, т. е. надо увеличить $\Delta d_{\max}$.

Отсюда можно установить основное правило при конструировании зажимных механизмов: в конструкцию зажим-

ных механизмов необходимо вводить специальное звено, допускающее повышение деформации. Наличие такого звена обеспечивает надежный зажим при отклонении диаметра обрабатываемой детали и предотвращает перегрузку в

звеньях механизма, в первую очередь в зажимных цангах. Введя специальное звено-буфер, допускающий деформации в сравнительно больших пределах, для надежности расчета можно пренебречь деформациями других звеньев.

Глава 35 Поворотно-фиксирующие механизмы

§ 1. Классификация поворотных фиксирующих механизмов

К поворотным фиксирующим механизмам относят следующие группы целевых устройств: поворотные устройства, на которых устанавливают инструменты или заготовки; механизмы изменения ориентации, на которых обрабатываемые заготовки поворачивают на заданный угол для последующей обработки с другой стороны; приводные механизмы поворотных устройств, механизмы поворота, обеспечивающие поворот устройств и их останов; фиксирующие механизмы, обеспечивающие точность положения инструментов или заготовок.

Поворотные устройства используют в автоматах, агрегатных станках и автоматических линиях различного технологического назначения. При последовательной обработке детали набором различных инструментов и при автоматической его смене широко применяют revolverные головки с вертикально, горизонтально или наклонно расположенной осью вращения (см. рис. 294). Перемещение обрабатываемых деталей с позиции на позицию при обработке на многопозиционных автоматах осуществляется с помощью шпиндельных блоков, поворотных столов, каруселей.

Шпиндельные блоки представляют собой отливки с отверстиями для подшипников, их изготавливают из высококачественного чугуна, нередко со специальными присадками. В отдельных конструкциях для изготовления шпиндельных блоков применяется стальное литье.

От точности изготовления и монтажа шпиндельного блока в значительной степени зависит точность обрабатываемых на многошпиндельном автомате и

полуавтомате деталей. Оси вращения шпинделей должны быть точно расположены относительно оси вращения шпиндельного блока и фиксирующих гнезд фиксатора. На точность деталей влияет также износ опор шпиндельного блока, что вызывает увеличение зазоров и опускание оси вращения блока. Для уменьшения износа опор шпиндельных блоков в многошпиндельных автоматах применяют специальные механизмы, обеспечивающие подъем шпиндельного блока во время его поворота.

При конструировании шпиндельных блоков большое внимание обращают на уменьшение их габаритных размеров. Увеличение размеров блока, особенно его наружного диаметра, увеличивает момент инерции блока и уменьшает допустимую скорость его поворота. Диаметр окружности, на котором располагаются оси шпинделей, выбирают наименьшим с учетом прочности стенок между отверстиями под шпиндели и создания условий отвода тепла от шпинделей.

Наружный диаметр блока зависит от размеров подшипниковых опор шпинделей.

Поворотные столы и карусели служат в основном для транспортирования обрабатываемых деталей от одной позиции обработки к другой. Они получили широкое распространение в металлорежущих автоматах и полуавтоматах, агрегатных станках и автоматических линиях.

Механизмы изменения ориентации обрабатываемых заготовок широко используют в автоматах и автоматических линиях. Они производят поворот заготовок на 90° или 180° относительно горизонтальной или вертикальной оси.

Поворот заготовок производится с помощью поворотных столов, барабанов, кантователей и поворотных лотков.

Требования, предъявляемые к поворотнo-фиксирующим механизмам, — быстрота, плавность и точность установки в рабочую позицию поворачиваемого механизма, недопустимость ударов и толчков при работе, надежность и долговечность работы. Для повышения точности и надежности работы механизма необходимо, чтобы в конце поворота скорость поворачиваемого механизма была равна нулю, это устраняет удар по фиксатору, который должен остановить движущийся по инерции механизм.

§ 2. Механизмы поворота

Механизмы поворота используют для поворота револьверных головок, шпиндельных блоков, каруселей и т. д. Они могут быть механическими, гидравлическими, пневматическими и пневмогидравлическими. Механические устройства поворота делят на кулачковые, мальтийские, рычажные и зубчатые, гидравлические бывают с гидроцилиндром, с однопластным гидромотором и с гидромотором.

Наибольшее распространение среди поворотных механизмов получили мальтийские механизмы, которые используют для периодического поворота шпиндельных блоков, револьверных головок и др.

Чаще используют «правильные» мальтийские механизмы с внешним (рис. 304,а) и внутренним (рис. 304,б) зацеплением, а также сферические

(рис. 304,в), которые поворачивают на равные углы с постоянной продолжительностью периодов выстоя и движения.

Мальтийский механизм (рис. 304,а) представляет собой мальтийский крест 1 с четырьмя радиальными пазами, в которые поочередно входит палец 2 кривошипа 3, поворачивая его каждый раз на $1/4$ оборота. По такому же принципу работают и мальтийские механизмы внутреннего зацепления и сферические. После выхода ролика из паза крест останавливается, и его положение фиксируется каким-либо устройством.

В механизмах с внешним зацеплением при малом числе пазов требуются значительно меньшие углы поворота кривошипа для соответствующего поворота креста, чем в механизмах с внутренним зацеплением или в сферических механизмах. Сферические механизмы могут быть построены с различными углами между валами кривошипа и креста. В них возникают меньшие динамические нагрузки, чем в механизмах с внешним зацеплением. В некоторых случаях использование сферического механизма позволяет избежать применения дополнительной конической зубчатой передачи. Мальтийские механизмы отличаются высоким КПД и простотой конструкции. Они обеспечивают достаточно плавность и быстроту поворота при высокой надежности в работе. К недостаткам следует отнести непостоянство скорости поворота креста и связанных с ним

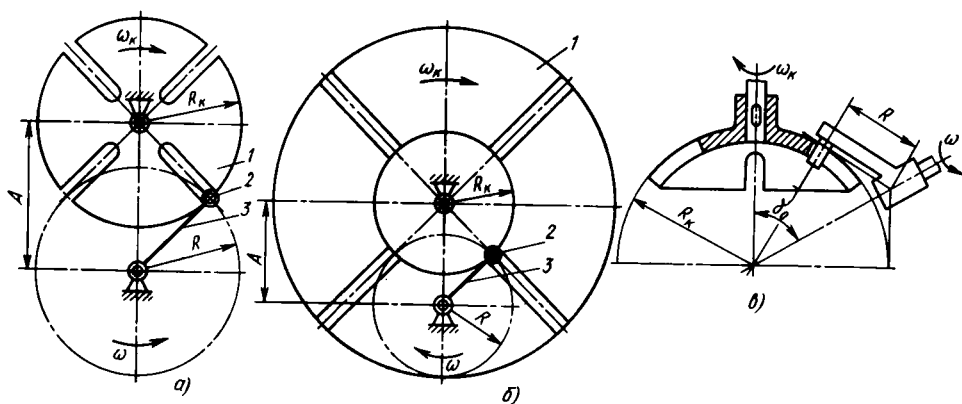


Рис. 304. Типы мальтийских механизмов:

R_k — радиус мальтийского креста; R — радиус кривошипа; A — межосевое расстояние; ω — угловая скорость кривошипа; ω_k — угловая скорость мальтийского креста; θ_0 — угол скрещивания осей креста и кривошипы

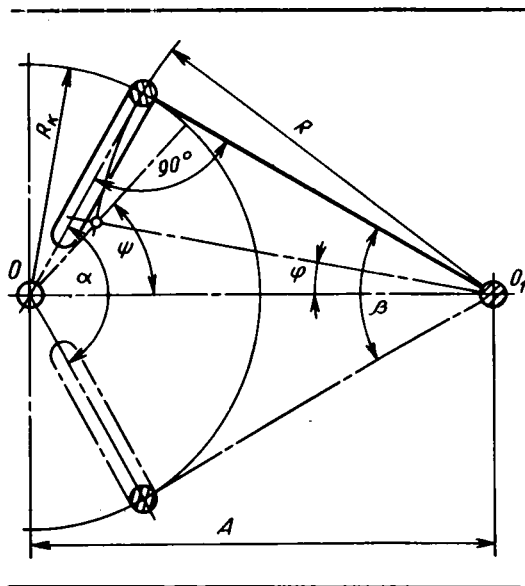


Рис. 305. Расчетная схема мальтийского механизма

деталей, большие пики ускорения (особенно при малом числе пазов), что вызывает большие инерционные нагрузки при большой скорости поворота или больших моментах инерции.

При проектировании механизмов холостых ходов автоматов особенно важно определить их допустимое быстродействие, характеризующееся временем перемещения элемента станка, и точность установки его в заданное положение. На быстроходность и точность позиционирования большее влияние оказывают масса или момент инерции перемещаемых масс, характер изменения и величина скорости поворота, путь перемещения.

Для обеспечения плавной работы механизма (см. рис. 304) угловая скорость мальтийского креста I должна быть равна нулю в момент входа пальца 2 кривошипа 3 в паз креста и в момент выхода из него. Для этого центр кривошипа должен быть расположен так, чтобы в момент входа и выхода вектор скорости пальца был направлен вдоль паза креста.

На рис. 305 показана расчетная схема мальтийского механизма с внешним зацеплением: α — угол поворота креста; β — угол поворота кривошипа; R_k — радиус креста; R — радиус кривошипа; A — межосевое расстояние; z_k — число пазов креста (на рисунке не показано);

ψ — текущий угол поворота креста; φ — текущий угол поворота кривошипа.

Из $\triangle OBO_1$ (рис. 305) можно записать $\beta = 180^\circ(1 - \frac{2}{z_k})$. Следовательно, угол поворота кривошипа $\beta = f(z_k)$ и при $z_k \rightarrow \infty$ угол $\beta \rightarrow 180^\circ$. Но для сокращения времени холостого хода угол β должен быть минимальным, поэтому выгодно выполнять мальтийские кресты с малым числом пазов. Однако из $\triangle OBO_1$ (рис. 305) можно записать:

$$A = \frac{R_k}{\cos \frac{180^\circ}{z_k}}. \quad (237)$$

Из формулы (237) следует, что при $z_k = 2$ межосевое расстояние $A \rightarrow \infty$, т. е. число пазов креста не может быть меньше трех, и для уменьшения габаритных размеров механизма следует увеличивать число пазов креста.

Число пазов мальтийского креста определяется числом позиций исполнительного органа (карусели, шпиндельного блока, револьверной головки и т. д.) и передаточным отношением кинематической цепи между ним и крестом. Обычно применяют кресты с числом пазов $z_k = 3 \div 12$.

В табл. 23 приведены кинематические зависимости различных мальтийских механизмов.

Для выполнения силового расчета и расчета деталей механизма на прочность по формулам, приведенным в табл. 23, определяют действующие при работе механизма скорости и ускорения. При этом время поворота мальтийского креста t_d , исходя из допустимой быстроходности механизмов позиционирования, можно определить приближенно из формулы для определения общего времени позиционирования [37]:

$$T_n \approx \frac{5 \sqrt[3]{J}}{\sqrt[4]{\delta} \sqrt{z_0}},$$

где $T_n = t_d + t_b + t_\phi + t_{рев}$; t_d — время поворота креста; t_b — время колебания ведомых масс; t_ϕ — время фиксации; $t_{рев}$ — время, затрачиваемое на реверс; $T_n > t_d$; δ — погрешность углового позиционирования, %; z_0 — число позиций поворачиваемого эле-

Кинематические зависимости мальтийских механизмов

Параметр	Механизм		
	с внешним зацеплением	с внутренним зацеплением	сферический (с углом между валами $\gamma_0 = 90^\circ$)
Угол поворота креста φ	$\arctg \frac{\lambda \sin \varphi}{1 - \lambda \cos \varphi}$	$\arctg \frac{\lambda \sin \varphi}{1 + \lambda \cos \varphi}$	$\arctg \lambda_1 \sin \varphi$
Передаточное отношение $i_k = \frac{\omega_k}{\omega}$	$\frac{\lambda (\cos \varphi - \lambda)}{1 - 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2}$	$\frac{\lambda (\cos \varphi + \lambda)}{1 + 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2}$	$\frac{\lambda_1 \cos \varphi}{1 + \lambda_1^2 \sin^2 \varphi}$
Максимальное передаточное отношение $i_{k \max}$	$\frac{\lambda}{1 - \lambda}$	$\frac{\lambda}{1 + \lambda}$	λ_1
Коэффициент ускорения креста $K_\epsilon = \frac{\epsilon_k}{\omega^2}$	$-\frac{\lambda (1 - \lambda^2) \sin \varphi}{(1 - 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2)^2}$	$-\frac{\lambda (1 - \lambda^2) \sin \varphi}{(1 + 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2)^2}$	$-\lambda_1 \sin \varphi \frac{1 + \lambda_1^2 (1 - \cos 2\varphi)}{(1 + \lambda_1^2 \sin^2 \varphi)^2}$
Время поворота креста t_d , с	$\frac{z_k - 2}{z_k} \frac{30}{n}$	$\frac{z_k + 2}{z_k} \frac{30}{n}$	$\frac{30}{n}$
Угловая скорость кривошипа ω , 1/с	$\frac{z_k - 2}{z_k} \frac{\pi}{t_d}$	$\frac{z_k + 2}{z_k} \frac{\pi}{t_d}$	$\frac{\pi}{t_d}$

Примечание. Для механизмов с внешним и внутренним зацеплением $\lambda = \frac{R}{A} = \sin \frac{\alpha}{2} = \sin \frac{\pi}{z_k}$, для сферических механизмов $\lambda_1 = \frac{R}{R_k} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \operatorname{tg} \frac{\pi}{z_k}$; ω_k — угловая скорость креста, 1/с; n — частота вращения кривошипа, об/мин.

мента станка; J — момент инерции планшайбы (стола).

Рассмотрим порядок расчета мальтийского механизма внешнего зацепления. Необходимые данные: число пазов креста z_k , межосевое расстояние A , время поворота элемента станка t_d , его вес G .

1. Определение углов поворота мальтийского креста и кривошипа:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{z_k}; \quad \beta = 180^\circ - \alpha.$$

2. Определение конструктивных размеров механизма; длина кривошипа

$$R = A \sin \frac{\alpha}{2}; \quad \text{радиус мальтийского}$$

$$\text{креста } R_k = A \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right); \quad \text{диаметр ролика}$$

$$d_p \approx \frac{R}{3 \div 4}; \quad \text{длина паза креста } l = R +$$

$$+ R_k = A + \frac{d_p}{2}; \quad \text{наружный диаметр}$$

366.

$$\text{креста } D_k = 2 \left(\sqrt{R_k^2 + \left(\frac{d_p}{2} \right)^2} + c \right)$$

(c — фаска, принимается обычно равной 1,5—3 мм); диаметр вала креста d выбирают из конструктивных соображений: $d < 2 \left(A - R - \frac{d_p}{2} \right)$; диаметр

вала кривошипа d_k выбирают конструктивно при соблюдении условия $d_k < 2 \times (A - R_k)$.

3. Определение угловой скорости ω_k , частоты вращения n_k и угловой скорости кривошипа ω , ускорения ϵ креста (см. табл. 23).

4. Выполнение силового расчета. Определяют статический момент сил трения в опорах элемента станка, максимальную нагрузку на ролике кривошипа, максимальный момент сопротивления на валу креста, средний крутящий момент на валу кривошипа, среднюю мощность, необходимую для поворота кривошипа, и максимальный

крутящий момент на валу кривошипа [6].

5. Проверка на прочность деталей механизма: ролика кривошипа — на изгиб, вала кривошипа — на кручение, вала креста — на кручение, поверхности паза креста и ролика кривошипа — на контактное напряжение [6].

§ 3. Механизмы фиксации

Для обеспечения точного положения поворотных устройств после поворота и удержания их от смещения под действием нагрузок, возникающих при обработке, применяют механизмы фиксации. При этом фиксацию осуществляют механизмами одинарной (с одним фиксатором) или двойной фиксации (с двумя элементами, один из которых служит фиксатором-упором, а второй доводит фиксируемое устройство до точного положения, определяемого упором).

На рис. 306 показаны схемы механизмов фиксации. Механизм одинарной фиксации (рис. 306,а) имеет фиксатор 1 прямолинейного действия, который во время фиксации поворачиваемого элемента 2 входит в специальные гнезда. Схема механизма двойной фиксации, обычно применяемого в многшпиндельных токарных автоматах для фиксации шпиндельных блоков, показана на рис. 306,б. После поворота шпиндельного блока 1 головки фиксирующего рычага 2 и запираю-

щего 4 свободно входят в пазы фиксирующих гнезд. Затем с помощью системы рычагов с приводом от кулачка 3 запирающий рычаг 4 поворачивает шпиндельный блок в обратном направлении, прижимая друг к другу фиксирующие поверхности гнезда и рычага 2, затем шпиндельный блок фиксируется. Перед началом поворота шпиндельного блока оба рычага отводятся.

У фиксатора следует различать поверхности фиксирующие и направляющие. На точность и долговечность механизма фиксации большое влияние оказывают форма фиксирующих поверхностей и их относительное перемещение. Если начальное касание фиксирующих поверхностей происходит в точке или по линии, то возникают большие удельные давления, вызывающие смятие. При поверхностном контакте удельные давления могут быть резко снижены.

Если фиксирующие поверхности имеют скольжение во время обработки, производимой на автомате, или во время поворота, то они подвержены повышенному износу, особенно интенсивному при больших удельных давлениях. Если скольжение фиксирующих поверхностей имеет место только во время фиксации, то износ будет значительно меньшим.

Поскольку механизм фиксации доводит фиксируемый элемент до точного положения, то при одинарной фиксации избежать скольжения фиксирующих поверхностей невозможно. Износ

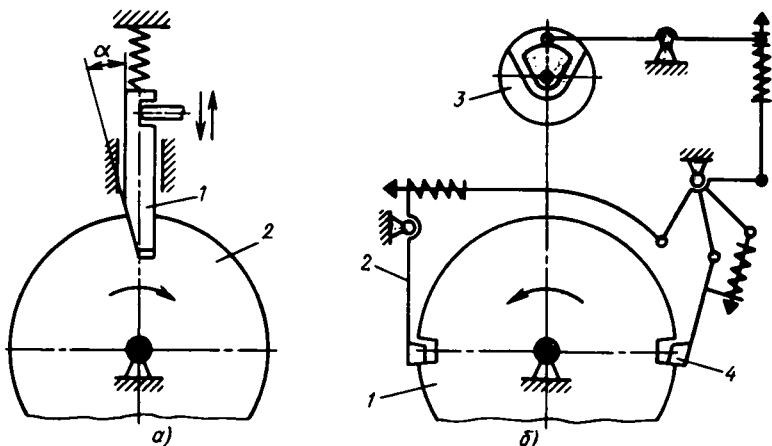


Рис. 306. Схемы механизмов фиксации

этих поверхностей может быть уменьшен при увеличении фиксирующих поверхностей, соответствующего выбора материала и термической обработки. При увеличении зазора в направляющих фиксатора вследствие износа снижается точность фиксации.

При двойной фиксации износ направляющих упора уменьшается, так как при правильно выбранной конструкции механизма фиксации скольжение в направляющих происходит при действии на упор незначительных нагрузок. Выборка зазора в направляющих упора и фиксатора происходит в момент прижатия поворачиваемого

механизма к упору. Поэтому при двойной фиксации зазоры в направляющих не оказывают сильного влияния на точность фиксации. Однако по мере износа направляющих упора точность фиксации снижается, поэтому следует обращать особое внимание на конструирование опор механизма ввода и вывода упора.

Влияние зазоров в направляющих и деформаций самих фиксаторов под действием больших сил обработки может быть устранено путем зажима поворачиваемого механизма после фиксации. Такой зажим осуществляется во многих конструкциях револьверных головок, столов агрегатных станков и т. п.

Глава **36** Общая характеристика и классификация систем автоматического управления станками

§ 1. Общие понятия и определения

Управление станком можно представить как процесс воздействия на него для обеспечения выполнения требуемого технологического процесса обработки детали с заданными точностью, производительностью и себестоимостью обработки. Оно может осуществляться вручную — человеком (рис. 307, а) или без участия человека — системой автоматического управления (САУ) (рис. 307, б).

При управлении станком вручную рабочий преобразует информацию чертежа детали 1 в определенные движения рук, осуществляя управление циклом работы станка 2 и перемещениями его рабочих органов. При этом рабочий использует свой опыт и знания о методах обработки, последовательности выполнения технологических переходов, применяемых режимах обработки, возможностях и особенностях конструкции станка, режущих инструментов и др.

При управлении станков вручную обеспечиваются большая универсальность и высокая мобильность. Действительно, любое изменение чертежа детали может быть учтено рабочим при управлении станком, очень быстро и без больших затрат производится переход на обработку других деталей. Однако управление станком вручную значительно ограничивает возможность повышения производительности обработки, а во многих случаях также снижает или делает нестабильной точность обрабатываемых деталей.

При применении САУ управление станком производится на основе заранее разработанной программы, вопло-

щенной в программноносителе 3 (кулачках, копиере, перфоленте и др.).

Система автоматического управления представляет собой комплекс устройств и средств связи, обеспечивающих точное и согласованное во времени взаимодействие рабочих и вспомогательных исполнительных механизмов станка в соответствии с программой управления, разработанной на основе принятого технологического процесса обработки. Программа управления — это последовательность команд, обеспечивающих заданное функционирование рабочих органов станка. Элемент или комплекс элементов, несущих на себе программу управления, называется программноносителем.

Варианты исполнения САУ приведены на рис. 308. При первом варианте исполнения САУ (рис. 308, а) программа 1 управления, воплощенная в программноносителе 2, вводится в управляющее устройство 3 (УУ), которое осуществляет управление рабочими органами станка. САУ в этом исполнении не контролирует, как в действительности отрабатывается программа управления (поток информации I_1).

При втором исполнении САУ (рис. 308, б) в управляющее устройство поступают не только задающие сигналы программы управления, характеризующие требуемое положение рабочих органов станка (поток информации I_1), но и сигналы от датчика 4 обратной связи (ДОС), характеризующие действительное положение рабочего органа станка (поток информации I_2), или от датчиков, характеризующих действительные параметры процесса обработки детали (поток информации I_3 , рис. 308, в). Управляющее уст-

ройство перерабатывает получаемую информацию по определенному, заложенному в нем алгоритму (закону). Если имеется рассогласование сигналов требуемого и действительного положения, на выходе УУ возникает управляющее воздействие, подаваемое на приводной двигатель 5.

В зависимости от числа управляемых координат станка, образующих вектор выходной величины $\bar{X}$, системы автоматического управления делятся на одномерные и многомерные.

§ 2. Управление обработкой на станке как процесс передачи и преобразования информации в системе чертеж-деталь

Исходным документом для изготовления детали является ее чертеж. На чертеже детали заданы геометрическая форма, размеры, требуемая точность изготовления, материал, шероховатость обрабатываемых поверхностей и др.

Совокупность сведений о детали, заготовке, режущих инструментах, технологическом оборудовании и условиях производства, содержащаяся в чертежах, технических условиях, нормалях, паспортах и т. п., представляет собой общую начальную информацию, которую имеет инженер-технолог до функционирования САУ.

Из общей начальной информации выделяют необходимую начальную информацию, на основе которой разрабатывают и составляют программу управления, вводимую с помощью программноносителя в САУ. Часть начальной информации переносят в операционную технологическую карту и используют для выбора технологического оборудования, оснастки, режущих инструментов и для настройки оборудования.

Таким образом, управление обработкой детали на станке можно рассматривать как процесс передачи и преобразования информации в системе чертеж — готовая деталь, а САУ как систему передачи и преобразования информации. При этом имеются как бы два участка передачи и преобразования информации (рис. 308, б): первый участок — внешней переработки и передачи информации (от чертежа

детали до программноносителя), второй участок — внутренней переработки и передачи информации (с ввода программноносителя в САУ до полного изготовления детали).

Действительные значения многих технологических параметров таких, как твердость обрабатываемого материала, припуск на обработку, точностные характеристики станка и др., обычно отличаются от тех, которые имеются в начальной информации и принимаются при составлении программы управления. Чтобы компенсировать влияние подобных возмущающих воздействий в САУ, используют не только начальную, но и дополнительную информацию, содержащую сведения о состоянии технологического процесса и станка, получаемую в процессе управления с помощью датчиков обратной связи (рис. 308, в). К дополнительной информации относятся действительные значения координат управляемых рабочих органов, величины крутящего момента на шпинделе, сил резания, температуры в зоне резания, вибрации и др.

При изготовлении детали по предложению канд. техн. наук Л. Л. Макарова [33] можно выделить три качественно различных этапа, из которых складывается процесс использования информации I , содержащейся в чертеже детали.

На I этапе инженер-технолог использует часть этой информации I_c при выборе соответствующих средств производства: станка, стандартных и нормализованных режущих и вспомогательных инструментов и приспособлений. В эти средства производства при их проектировании и изготовлении была вложена соответствующая информация, которая и позволяет применять их для изготовления определенного класса деталей. Инженер-технолог производит, по существу, сравнение заложенной в них информации с соответствующей частью информации, даваемой чертежом детали. Например, токарно-винторезный станок обеспечивает обработку деталей с определенной точностью получения соосных цилиндрических и конических поверхностей, а также торцов, перпендикулярных оси вращения.

На II этапе используют другую часть

информации J_v при проектировании и изготовлении дополнительных специальных инструментов и приспособлений, кулачков, копиров, шаблонов и др., а также при наладке автомата (установка кулачков, упоров, копира и др.). На III этапе оператор использует часть информации J_m при управлении станком. Пользуясь чертежом детали, оператор, управляя вручную, обеспечивает получение тех ее параметров, которые не гарантируются станком, технологической оснасткой и режущим инструментом (на I и II этапах).

Таким образом, полное количество информации, переносимое на деталь в процессе ее изготовления по чертежу,

$$J = J_c + J_v + J_m. \quad (238)$$

Анализ формулы (238) показывает, что чем больше сумма $J_c + J_v$ по сравнению с J_m , тем больше степень автоматизации процесса изготовления детали, количественно характеризуемая отношением

$$\alpha = \frac{J_c + J_v}{J_c + J_v + J_m}. \quad (239)$$

При обработке на универсальном станке с ручным управлением доля J_c и J_v будет незначительной, а доля информации J_m максимальной. В этом случае имеем малую степень автоматизации ($\alpha < 1$). При обработке детали на станке-автомате $J_m = 0$ и $\alpha = 1$.

Доля информации J_v будет определять степень мобильности применяемого оборудования, которая количественно определяется отношением

$$\beta = \frac{J_c}{J_c + J_v}. \quad (240)$$

При переходе к обработке новой детали на автомате с системой управления с распределительным валом (РВ) необходим трудоемкий процесс изготовления кулачков и наладки автомата, т. е. $J_v \rightarrow \max$ и $\beta \rightarrow 0$. При приме-

нении универсального станка с ручным управлением или станка с ЧПУ, наоборот, доля $J_v \rightarrow 0$ и $\beta \rightarrow 1$.

§ 3. Классификация систем автоматического управления и их сравнительный анализ

По виду начальной информации, включенной в программу управления, все САУ можно классифицировать на две группы.

К первой группе относятся САУ, работающие на основе полной, заранее рассчитанной программы управления. Главной задачей САУ данной группы является выполнение заданной программы без ее изменения и коррекции на основе получаемых результатов процесса обработки. К данной группе относится большинство САУ станками: системы управления с РВ, копировальные системы управления, системы циклового программного управления (ЦПУ) и системы числового программного управления (ЧПУ).

Ко второй группе относятся САУ, работающие на основе неполной начальной информации, которая с целью оптимального управления дополняется и корректируется в процессе обработки на основе использования текущей технологической информации об управляемом процессе, получаемой с помощью различных датчиков (см. рис. 308, в). К данной группе относятся самоприспособляющиеся (адаптивные), самонастраивающиеся, самоорганизующиеся и самообучающиеся системы управления. В самоприспособляющихся системах достижение оптимального управления осуществляется изменением только управляющего воздействия. В самонастраивающихся системах оптимальное управление производится изменением параметров самой системы, в самоорганизующихся системах — изменением структуры, а в самообучающихся системах — изменением алгоритма управления. Наибольшее применение нашли самоприспособляющиеся (адаптивные) системы управления как более простые.

По наличию обратной связи все САУ делят на две группы: разомкнутые и замкнутые.

В разомкнутых системах (см. рис. 308, а) отсутствует контроль действительного положения рабочего органа станка, в которое он устанавливается в результате прохождения и преобразования потока начальной информации I_1 , вводимой программно-системой. Поэтому точность перемещения рабочего органа, а следовательно, и точность обработки будут зависеть от точности передаточных механизмов привода подачи. Однако эти системы по сравнению с замкнутыми проще конструктивно, надежнее в работе и дешевле. Разомкнутыми системами управления являются системы управления с РВ, механические копировальные системы, системы ЧПУ, построенные на основе применения шаговых электродвигателей (ШД).

Замкнутые системы управления можно разделить на три подгруппы:

а) системы управления с обратной связью по положению рабочих органов станка (стола, салазок, шпиндельной бабки) — поток информации I_2 (см. рис. 308, б); к этой группе относятся следующие копировальные системы, большинство систем ЧПУ замкнутого типа;

б) системы управления с обратной связью по положению рабочих органов станка и с компенсацией погрешностей станка (тепловых деформаций, износа, вибраций и др.); в этих системах имеются дополнительные датчики, измеряющие погрешности станка и передающие сигналы для коррекции начальной информации;

в) самоприспособляющиеся системы управления (см. рис. 308, в), в которых использованы датчики, измеряющие параметры процесса обработки (силу резания, температуру в зоне резания, вибрации и др.), для дополнения и коррекции начального потока информации I_1 при изменении припуска на заготовке, твердости материала и других факторов, которые предусмотреть заранее невозможно (поток информации I_3); эти системы управления являются самыми сложными, но обеспечивают высокую точность обработки, оптимальную производительность и минимальную себестоимость обработки.

САУ можно рассматривать как систему, внутри которой осуществляется

передача сигналов от элемента к элементу. Сами же элементы системы можно считать преобразователями сигналов.

Тип сигналов определяет, с одной стороны, принципы действия и конструкцию элементов, формирующих и преобразующих сигналы и, с другой стороны, — методы математического описания самого процесса передачи и преобразования сигналов в системе.

По характеру управляющих сигналов САУ делят на две группы: непрерывные (аналоговые) и дискретные.

Непрерывные сигналы представляют собой величины, значения которых являются непрерывными функциями времени.

Звено системы, выходная величина которого изменяется плавно при плавном изменении входной величины, является звеном непрерывного действия. Непрерывные САУ состоят только из звеньев непрерывного действия.

Дискретной САУ является система, содержащая хотя бы одно звено дискретного действия. Таким звеном называется звено, выходная величина которого изменяется дискретно, т. е. скачками, даже при плавном изменении входной величины. Скачки выходной величины могут происходить либо при прохождении входной величиной определенных пороговых значений — звено релейного действия, либо через определенный интервал времени — звено импульсного действия. В непрерывных системах программа управления задается в виде непрерывного сигнала (профилем кулачка или копира, углом сдвига по фазе двух напряжений). В дискретных системах программа управления задается, например, в виде единичных импульсов (например, системы ЦПУ и ЧПУ с шаговым электродвигателем и др.).

Для автоматического управления различных типов станков применяют системы управления с РВ, следящие копировальные системы, системы ЦПУ и системы ЧПУ.

Сравнительный анализ различных САУ производится по следующим основным критериям: надежность работы, точность отработки программы управления, мобильность, быстроедействие (ввод, переработка информации и исполнение команд), сложность конструкции и стоимость, возможность уп-

равления сложным циклом при обработке несколькими различными инструментами, дистанционность в управлении, возможность самоприспособления

к изменяющимся условиям обработки для получения максимальной точности и производительности и минимальной себестоимости.

Глава 37 Системы управления с РВ и циклового программного управления

§ 1. Системы управления с РВ, их принцип работы и классификация

Прообразом систем управления с РВ можно считать механические копирующие системы управления (рис. 309).

В этих системах при обработке детали 1 плоский копир 5 (кулачок) через шуп 4 (толкатель) управляет перемещением поперечного суппорта 3 с режущим инструментом и обеспечивает необходимую рабочую подачу $s_{\text{поп}}$ при перемещении продольного суппорта 2 с подачей $s_{\text{пр}}$.

Хотя эти системы конструктивно просты и надежны, при их работе возникают большие потери на холостые ходы, обусловленные необходимостью возврата копира в исходное положение при повторении цикла обработки, а также имеет место повышенный износ копира из-за действия на него силы резания. В данных системах происходит управление работой только одного инструмента.

Если взять плоские копиры и обер-

нуть их на цилиндры или изготовить в виде дисковых кулачков, которые будут установлены на один общий вал, называемый распределительным, то при его вращении получается система управления большим количеством различных рабочих органов с надежной и максимальной синхронизацией всех движений цикла при обработке заданной детали.

Полученные таким образом системы управления с РВ позволяют путем построения циклограмм заранее спроектировать и рассчитать рабочий цикл любой сложности, обеспечив строгое выполнение заданного технологического процесса обработки за определенный промежуток времени $T = t_p + t_{x,x}$, соответствующий, как правило, одному обороту РВ. Распределительный вал обеспечивает порядок осуществления различных технологических переходов и цикличность процесса обработки в целом.

Программа управления, составленная в числовом виде и записанная в карте наладки, воплощается в программноносители, которыми являются кулачок для одного исполнительного механизма и система кулачков (рабочих и командных), установленных и закрепленных в соответствии с циклограммой на РВ, для автомата в целом (рис. 310). Величины перемещений рабочих органов при этом задаются подъемом h_k на кулачке, а их длительность на холостых ходах — углами β_1 (или величиной $l_{x,x1}$) при подводе и β_2 (или величиной $l_{x,x2}$) при отводе рабочего органа. Длительность перемещений на рабочем ходе задается углом α (или величиной l_p).

Системы управления с РВ широко применяют в специальных и универсальных полуавтоматах и автоматах различного технологического назначения в массовом, крупносерийном и иногда серийном производстве.

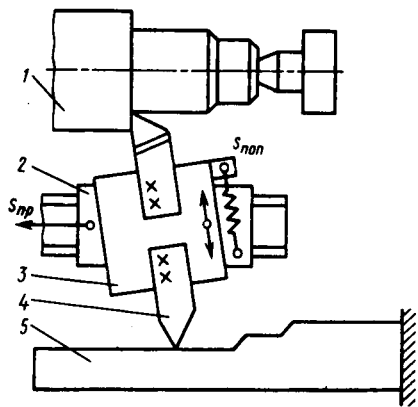


Рис. 309. Схема механической копирующей системы управления

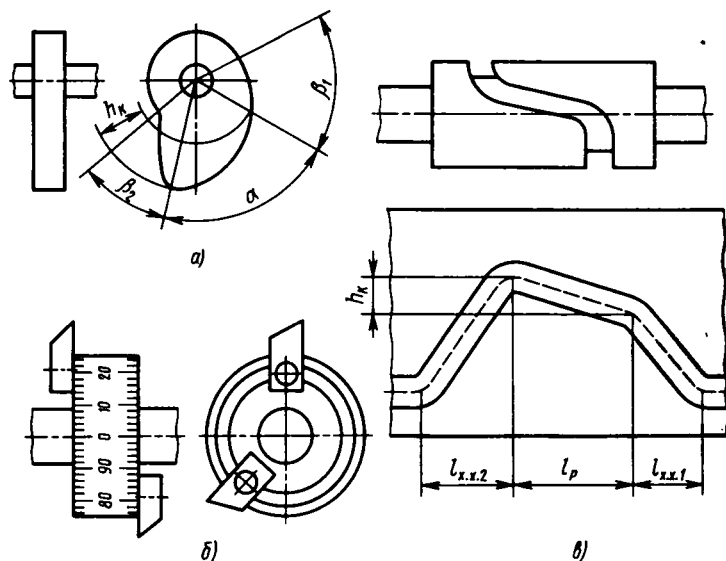


Рис. 310. Кулачки:

а — дисковый; б — командный; в — барабанный кулачок и его развертка

Проф. Г. А. Шаумян предложил классифицировать все системы управления с РВ по принципу совершения холостых ходов на три группы [55].

Системы управления группы I с РВ (рис. 311, а). Привод вращения шпинделя и РВ с кулачками осуществляется от электродвигателя М соответственно через гитары сменных зубчатых колес Х и Y. Особенностью этих систем управления является то, что частота вращения РВ для каждой настройки гитары сменных зубчатых колес Y будет постоянной в течение всего времени цикла T. Поэтому при изменении времени рабочих ходов пропорционально изменяется и время холостых ходов.

Другая особенность заключается в том, что кулачки, выполняющие

холостые хода, для определенного круга работ являются постоянными, требующими определенного постоянного угла поворота РВ ($\beta_1 = \text{const}$) для осуществления холостых ходов. В то же время кулачки, выполняющие рабочие хода, в зависимости от характера работ в каждом отдельном случае требуют различных углов поворота РВ.

Время холостых ходов $t_{x,1} = \frac{\beta_1}{2\pi} T$, где β_1 — угол холостых ходов (без учета совмещенных холостых ходов).

Производительность автоматов с системами управления группы I

$$Q_1 = \frac{1}{T} = K \left(1 - \frac{\beta_1}{2\pi} \right) = K \eta_1.$$

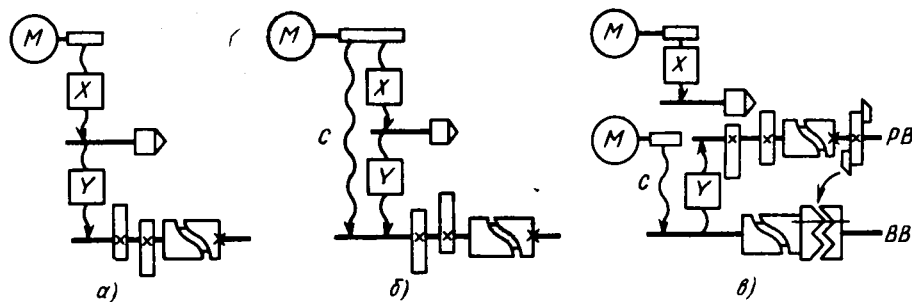
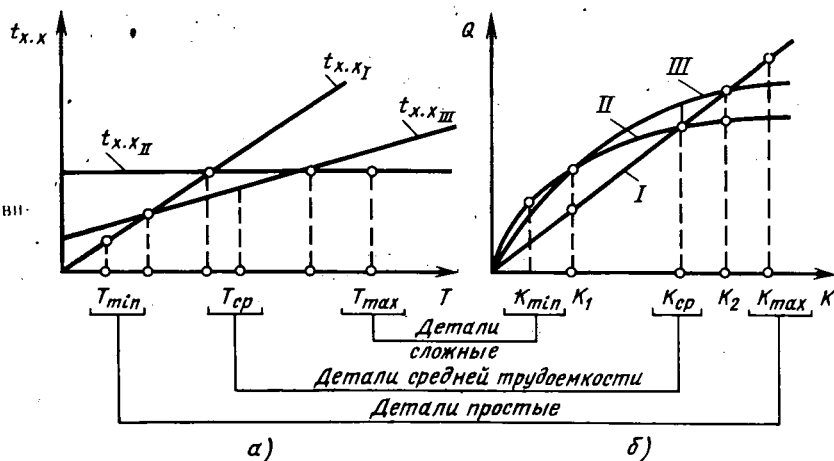


Рис. 311. Принципиальные схемы автоматов с системами управления с РВ:

а — группа I; б — группа II; в — группа III

Рис. 312. Графики зависимостей:

а — $t_{x,x} = f(T)$; б — $Q = f(K)$



где $K = \frac{1}{t_p}$ — технологическая произ-

водительность; $\eta_i = 1 - \frac{\beta_i}{2\pi}$ — коэффициент производительности автоматов с системами управления группы I.

Анализ схемы работы (см. рис. 311, а), а также зависимостей $t_{x,xI} = f(T)$ и $Q_i = f(K)$ (рис. 312) показывает, что при $\beta_i = \text{const}$ и при переменном K (или T) время $t_{x,xI}$ будет переменным. Поэтому при обработке сложных деталей с большим временем t_p (имеем $T_{\max}$ и $K_{\min}$) время $t_{x,xI}$ будет также большим, хотя из условий работы механизмов холостых ходов оно может быть гораздо меньше. В результате производительность автоматов получается низкой.

При обработке простых деталей ($T_{\min}$ и $K_{\max}$) производительность автомата получается большой, но необходимо учитывать, что время на холостые хода может получиться меньше того, которое допускается прочностью механизмов холостых ходов.

Системы управления группы I с РВ применяют в большинстве неметаллорежущих автоматов (пищевые, текстильные, полиграфические и др.), а также в металлорежущих автоматах для обработки простых деталей (например, в автоматах продольного точения мод. 1103, 1Б10П, в автоматах фирм «Tornos» и «Bechler» (Швейцария), «Strohm» (ФРГ) и др.).

Системы управления группы II с РВ (рис. 311, б). Особенностью систем

управления этой группы является то, что РВ в течение цикла T имеет две скорости вращения.

Медленное вращение РВ при выполнении рабочих ходов производится через гитару сменных зубчатых колес Y , позволяющую менять частоту вращения РВ при обработке различных деталей.

Быстрое вращение РВ при выполнении холостых ходов производится по самостоятельной кинематической цепи с постоянным передаточным отношением C .

Частота вращения РВ на холостых ходах является постоянной ($n_{x,x} = \text{const}$), и ее величину выбирают исходя из прочности механизмов холостого хода.

Время холостых ходов $t_{x,xII} = \frac{\beta_{II}}{2\pi n_{x,x}} = \text{const}$, где β_{II} — угол холостого хода. Например, в автомате мод. 1Б240-6 $\beta_{II} = 215^\circ$ и $t_{x,xII} = 2$ с.

Таким образом, изменение времени рабочих ходов в этих системах управления не влияет на время холостых ходов, оно остается постоянным (см. рис. 312). В некоторых многошпиндельных автоматах лимитирующим механизмом с точки зрения холостых ходов является механизм подачи пруткового материала, поэтому скорость вращения РВ на холостых ходах может изменяться и настраиваться в зависимости от требуемой величины подачи материала.

Цикловая производительность автоматов с системами управления группы

$$II \text{ с РВ } Q_{II} = \frac{1}{T} = K \frac{1}{1 + K t_{x,II}} = K \eta_{II},$$

где $\eta_{II} = \frac{1}{1 + K t_{x,II}}$ — коэффициент производительности автоматов с системами управления группы II. Величина η_{II} является переменной, зависящей от технологической производительности K .

Учитывая, что все холостые ходы в данных системах управления выполняются при максимальной скорости вращения РВ, наиболее эффективно их применять при обработке сложных деталей и деталей из труднообрабатываемых материалов (см. рис. 312).

Системами управления группы II с РВ оснащены некоторые одношпиндельные и подавляющее число многшпиндельных автоматов и полуавтоматов — мод. 1Б240, 1Б265, 1Б290, автоматы фирмы «Gildemeister» и «Pittler» (ФРГ), «Acme — Gridley» (США) и др.

Системы управления группы III (промежуточной) с РВ (рис. 311, в). Они представляют собой сочетание систем управления групп I и II. Распределительный вал в этих системах вращается, как в системах группы I, с одной скоростью при выполнении всех рабочих и части холостых ходов (подвод и отвод поперечных суппортов). Для этих холостых ходов по аналогии с системами группы I имеем $\beta_1 = \text{const}$, а $t_{x,I} = \frac{\beta_1}{2\pi} T$.

Остальные холостые ходы (подача и зажим прутка, поворот револьверной головки, переключение частоты и направления вращения шпинделя и др.) выполняются с помощью вспомогательного вала (ВВ), вращение на который передаются с максимально возможной постоянной для данного автомата скоростью по цепи с передаточным отношением C . По аналогии с системами группы II для этих холостых ходов $t_{x,II} = \text{const}$. Выполнение холостых ходов с помощью ВВ управляется командными кулачками, установленными на РВ.

Общее время холостых ходов для автоматов с системами управления группы III $t_{x,III} = t_{x,I} + t_{x,II}$. Тогда $T = t_p + t_{x,I} + t_{x,II}$.

Подставляя в эту формулу соответствующие выражения T и $t_{x,I}$, находим,

$$\text{что } Q_{II} = K \left(1 - \frac{\beta_1}{2\pi}\right) \frac{1}{1 + K t_{x,II}} = K \eta_{II}$$

Анализ формулы производительности показывает, что системы управления группы III занимают промежуточное положение между системами группы I и II, и поэтому рекомендуется их применять для обработки деталей средней сложности, когда имеем средние значения времени цикла T_{cp} и технологической производительности K_{cp} (см. рис. 312).

Системами управления с РВ группы III оснащены токарно-револьверные автоматы — мод. 1Д112—1Д118, 1Б124—1Б136, автоматы фирм «Index» и «Traub» (ФРГ), фирмы «Tarex» (Швейцария) и др., а также некоторые неметаллорежущие автоматы и полуавтоматы.

§ 2. Особенности расчета и проектирования систем управления с РВ

При выборе необходимой системы управления с РВ исходными данными являются структура технологического процесса обработки заданной детали и величина получаемой технологической производительности. Определив приближенные значения коэффициентов производительности для каждой из возможной группы системы управления, выбирают или проектируют ту группу, для которой получается наибольшая цикловая производительность.

При использовании имеющихся полуавтоматов и автоматов главной задачей является расчет и составление программы управления, проектирование и изготовление программноносителей (кулачков) и наладка автомата или полуавтомата в соответствии с разработанной циклограммой и программой управления [17]. После выбора соответствующей группы системы управления с РВ рассчитывают и проектируют кулачковые механизмы (рис. 313). При этом необходимо: а) выбрать конструкцию кулачкового механизма (дисковый или барабанный кулачок, остроконечный или роликовый

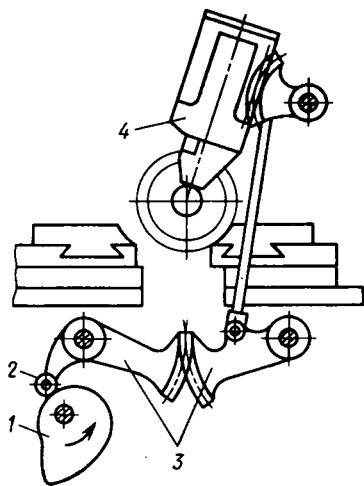


Рис. 313. Схема кулачкового механизма для привода и управления циклом суппорта:

1 — кулачок; 2 — башмак; 3 — толкатель и передаточные рычаги; 4 — суппорт

башмак, качающийся или поступательно перемещающийся толкатель); б) определить размеры кулачкового механизма (диаметры кулачка и роликового башмака, размеры рычагов, расстояние между опорами поступательно перемещающегося толкателя, величину консоли толкателя, передаточное отноше-

ние рычагов и др.); в) обосновать и выбрать кривые, по которым будут профилироваться участки рабочих и холостых ходов на кулачке. От конструкции и размеров кулачкового механизма в значительной степени зависит производительность и надежность работы автомата, точность обработки деталей, габаритные размеры автомата и др.

Наиболее важным параметром кулачкового механизма, который оказывает влияние на указанные выше характеристики автомата, является угол давления θ (рис. 314, а). Как показывает анализ, при больших значениях этого угла увеличивается производительность автомата (меньше угол β), уменьшаются размеры кулачка, но надежность автомата резко снижается, так как может происходить заклинивание кулачкового механизма. При малых значениях θ получаем обратную картину.

Проф. Г. А. Шаумяном было введено понятие оптимального угла давления $\theta_{\text{опт}}$ и разработана методика его расчета [55]. Схема кулачкового механизма на рис. 314, а была принята как эталонная, и для нее проведены расчеты и выведена формула для определения $\theta_{\text{опт}}$:

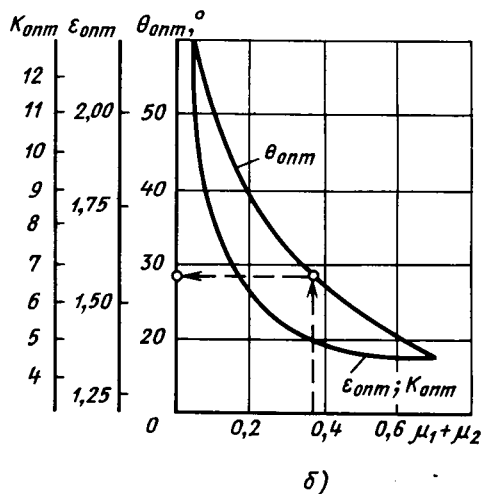
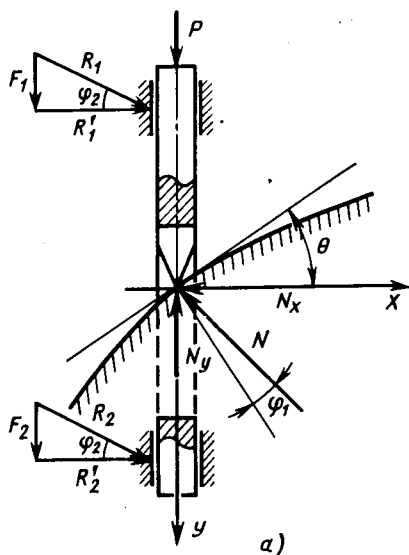


Рис. 314. Схема определения оптимального угла давления $\theta_{\text{опт}}$:

а — схема эталонного кулачкового механизма и действующих сил (N_x и N_y — составляющие силы N , R_1 , R_2 — реакции в опорах; R'_1 , R'_2 , F_1 , F_2 — их составляющие; ϕ_1 и ϕ_2 — углы трения); б — номограмма

$$\operatorname{tg} \theta_{\text{опт}} = \frac{1 - \mu_1 \mu_2}{(\mu_1 + \mu_2) K_{\text{опт}}}, \quad (241)$$

где μ_1 — коэффициент трения башмака о поверхность кулачка; μ_2 — коэффициент трения в опорах толкателя; $K_{\text{опт}}$ — оптимальное значение коэффициента запаса $K = \frac{\operatorname{tg} \theta_3}{\operatorname{tg} \theta}$, здесь θ_3 — угол заклинивания.

Была разработана номограмма для определения по сумме $\mu_1 + \mu_2$ оптимальных углов давления, значений $K_{\text{опт}}$ и коэффициента возрастания нагрузки $\varepsilon_{\text{опт}}$. Пример определения $\theta_{\text{опт}}$, $K_{\text{опт}}$ и $\varepsilon_{\text{опт}}$ показан штриховыми линиями на рис. 314, б. Здесь $\varepsilon = \frac{N}{P}$, где P — полезная нагрузка, $N = \sqrt{N_x^2 + N_y^2}$ — полная реакция кулачка на толкатель.

Для произвольного кулачкового механизма $\theta_{\text{опт}}$ определяют, приводя механизм к эталонной схеме и выражая различия в конструкции и размерах башмака через коэффициент λ_1 , а различия в конструкции и размерах толкателя через λ_2 . Определив эти коэффициенты (для эталонной схемы $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$), находим приведенные коэффициенты трения $\mu_{n1} = \mu_1 \lambda_1$ и $\mu_{n2} = \mu_2 \lambda_2$, затем подставляем их в формулу (241) вместо значений μ_1 , μ_2 .

При профилировании кулачков исходят из положения, что кривые рабочих ходов должны обеспечивать закон перемещения, определяемый характером технологического процесса. Для металлорежущих автоматов обычно требуется равномерное перемещение исполнительного механизма для обеспечения постоянной величины подачи режущего инструмента. Этому требованию отвечает закон Архимедовой спирали, по которому профилируют участки рабочих ходов на дисковых кулачках. На цилиндрических кулачках эти участки профилируют по закону винтовой линии. К кривым холостых ходов предъявляется требование обеспечения минимального времени холостого хода. При этом угол давления θ не должен превосходить оптимальное значение и возникающие в механизме силы инерции не должны быть выше допустимых.

Вследствие того, что характер и величина инерционных воздействий в механизме определяются ускорением толкателя, для участков холостого хода, задаются законом изменения ускорения.

На практике участки холостых ходов дисковых кулачков чаще всего профилируют по параболическому закону, применяются также закон логарифмической спирали, закон Архимедовой спирали и др.

Для сокращения затрат времени и упрощения построения профиля участков холостых ходов на дисковых кулачках их очерчивают по предварительно построенным и изготовленным шаблонам.

Рассмотрение систем управления с РВ показывает, что они работают на основе полной начальной информации и являются системами разомкнутого типа (см. рис. 308, а); программа управления в них задается в аналоговом виде (см. рис. 310). Это системы механического типа, они просты конструктивно, надежны в работе и имеют невысокую стоимость. Они обеспечивают управление сложным циклом обработки с одновременным участием нескольких инструментов с максимально возможным совмещением рабочих и холостых ходов.

Анализ процесса использования информации J (см. гл. 36, § 2) для систем управления с РВ показывает, что доля информации J_m будет очень малой, а для станка-автомата $J_m = 0$, что свидетельствует о высокой степени автоматизации.

С другой стороны, доля информации J_o для систем с РВ будет очень большой в связи с необходимостью проектирования и изготовления кулачков, специальных инструментов, а также проведения наладки автомата, что свидетельствует о низкой мобильности систем управления с РВ.

Преобразование числовой информации чертежа детали в аналоговый вид (кривые кулачков) требует трудоемкого изготовления полученных физических аналогов (кулачков), а также приводит к погрешностям передачи информации, получаемым при изготовлении кулачков и из-за их износа в процессе эксплуатации.

§ 3. Системы циклового программного управления

Системы циклового программного управления (ЦПУ) являются в какой-то степени развитием систем управления с РВ. Они могут быть электрическими, гидравлическими и пневматическими. Особенность системы ЦПУ заключается в том, что одна часть программы управления — информация о цикле и режимах обработки — задается в числовом виде и устанавливается на пульте управления штекерами, переключателями или вводится на перфокартах и др. (рис. 315, а). Другая часть — размерная информация, характеризующая величины перемещений рабочих органов станка, устанавливается с помощью путевых упоров на специальных линейках или барабанах (рис. 315, б). Для каждой координаты настраивают и устанавливают свою линейку.

На рис. 316 показана общая блок-схема системы ЦПУ. Информация о цикле и режимах обработки задается блоками задания и поэтапного ввода программы. Блок задания программы (программатор) представляет собой штекерную панель (см. рис. 315, а), а иногда поворотный барабан или перфокарты. Получили распространение программаторы с ручным клавишным набором и запоминанием программы на электрических запоминающих устройствах (магнитных сердечниках, интегральных схемах). Блок поэтапного ввода программы выполняется в виде электронной или релейной счетно-распределительной схемы. В некоторых системах ЦПУ для поэтапного ввода программы применяют шаговые искатели.

Далее информация поступает в блок автоматики, предназначенный для усиления и размножения команд, поступающих на исполнительный блок, затем, чаще всего через электромагнитные муфты, информация передается на исполнительные механизмы станка (привод подач, коробку скоростей и др.). Блок автоматики при необходимости обеспечивает выполнение элементарных циклов и может выполнять ряд логических функций.

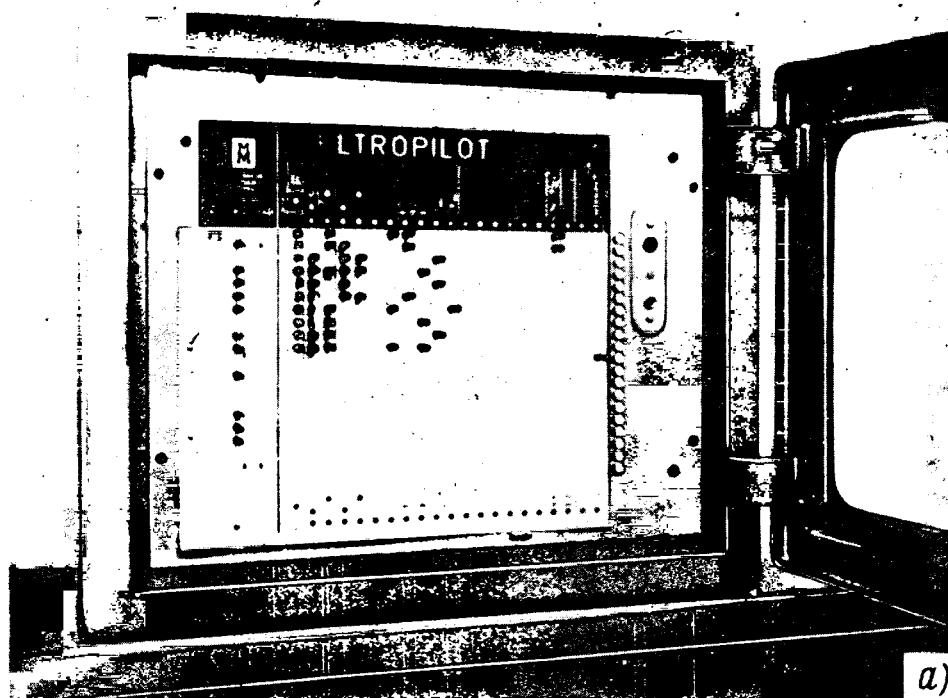
Размерная информация задается упорами на линейках 1 и 4, закреп-

ленных на продольном (ось Z) и поперечном (ось X) суппортах. При перемещении линейек упоры воздействуют на блоки конечных выключателей 2 и 3, обеспечивающих контроль за окончанием отработки каждого этапа и выдачу сигналов на блок преобразования сигналов контроля и далее на блок поэтапного ввода программы для включения следующего этапа обработки.

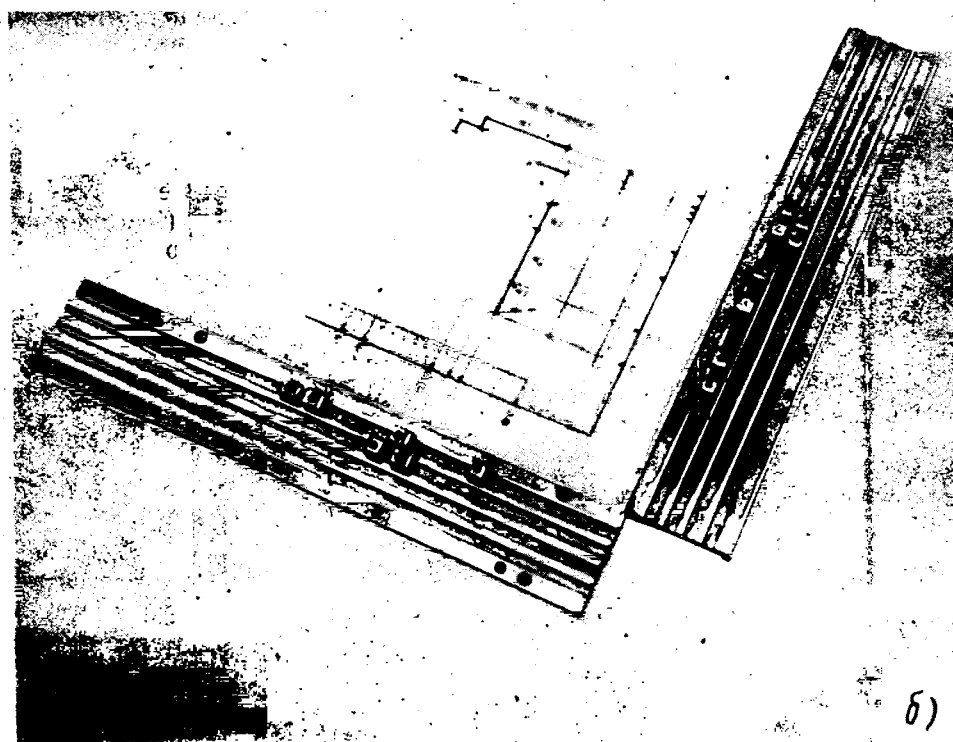
Рассмотренный способ задания программы управления позволяет значительно снизить долю информации J_v за счет увеличения доли J_c и тем самым повысить мобильность системы ЦПУ по сравнению с системами управления с РВ. Трудоемкими при переналадке остаются только установка и настройка путевых упоров. Однако их не надо каждый раз изготавливать заново (как кулачки), и настройку можно делать заранее вне станка, так как линейки делаются съемными.

Задание размерной информации с помощью путевых упоров обуславливает дискретный способ управления (выдачу команд управления только в местах установки упоров), и управление перемещениями возможно только по прямолинейному циклу. Это значительно ограничивает технологические возможности станков с ЦПУ, а также может приводить к получению «нежесткого» цикла обработки ($T \neq \text{const}$), что затрудняет совмещение рабочих и холостых ходов (например, на агрегатных станках с головками с гидроприводом). На рис. 317, а показаны возможные циклы перемещений суппортов на токарном станке с системой ЦПУ, а на рис. 317, б — цикл перемещений стола и шпиндельной бабки на фрезерном станке с системой ЦПУ (сплошными линиями показаны рабочие, а штриховыми — холостые ходы). Системы ЦПУ применяют для управления фрезерными и токарными станками (например, станками мод. 6Р13Ц, 6С12Ц, 1А341Ц, 1416Ц и др.), а также промышленными роботами (например, мод. СМ40Ц4301, «Универсал-15 М» и др.).

Существуют комбинированные системы управления на основе системы ЦПУ. Так, например, наряду с традиционными токарными автоматами с системами управления с РВ выпуска-



a)



б)

Рис. 315. Способ задания программы управления в системах ЦПУ:
а — штекерная панель; б — линейки с упорами

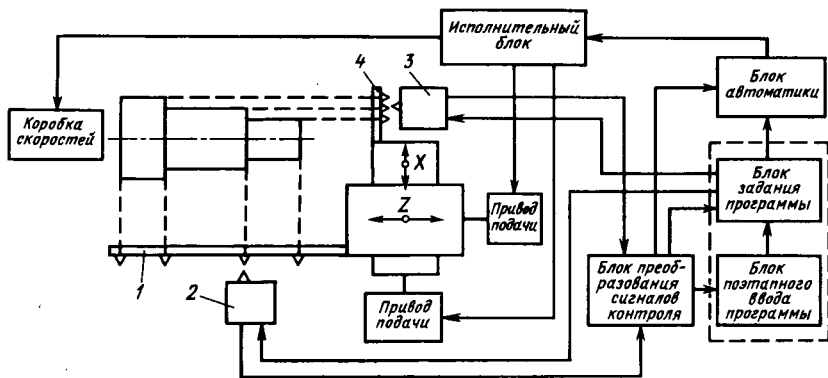


Рис. 316. Общая структурная схема системы ЦПУ

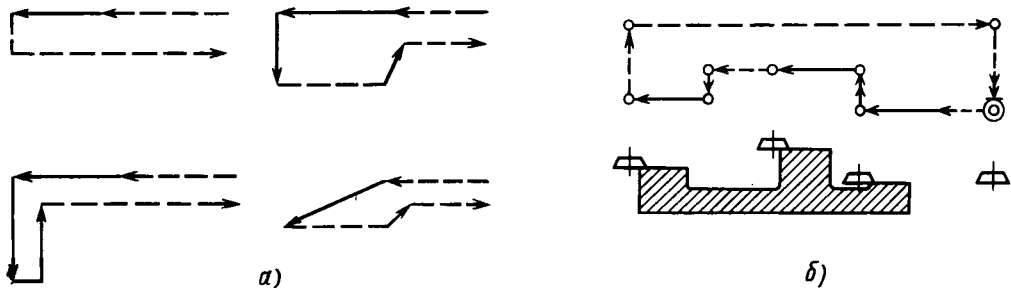
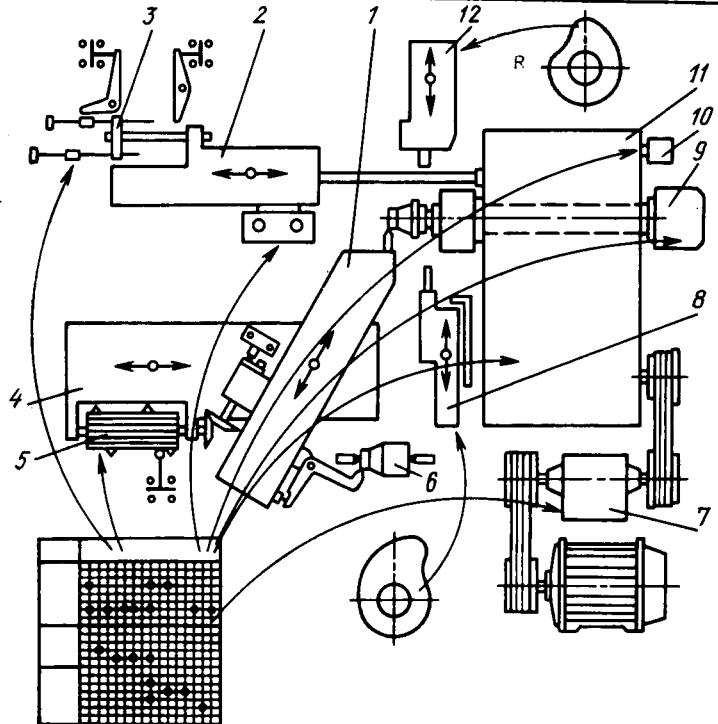


Рис. 317. Циклы перемещений инструмента:
а — на токарном станке; б — на фрезерном станке

Рис. 318. Схема комбинированной системы управления токарно-револьверного автомата:

1 — копировальный суппорт; 2 — револьверный суппорт; 3 — барабан с упорами, задающими величины перемещения револьверного суппорта; 4 — продольный суппорт; 5 — барабан с упорами, задающими величину перемещения продольного суппорта; 6 — копир; 7 — коробка скоростей; 8, 12 — поперечные суппорты с управлением от кулачков; 9 — механизм зажима заготовки; 10 — электродвигатель ускоренного перемещения револьверного суппорта; 11 — коробка подач револьверного суппорта.



ются автоматы, в которых управление циклом, режимами обработки и перемещениями продольных суппортов производится системой ЦПУ, а управление — перемещениями поперечных суппортов кулачками (рис. 318). Кроме того, имеется копировальный суппорт с уп-

равлением от следящей копировальной системы. Применение таких комбинированных систем управления позволяет при широких технологических возможностях и высокой степени автоматизации упростить переналадки автоматов и сократить затраты времени на нее.

Глава 38 Следящие системы автоматического управления

§ 1. Устройство и характеристика следящих систем управления станками

Следящие системы управления являются одной из разновидностей систем автоматического регулирования (САР), которые обеспечивают поддержание выходной величины управляемого объекта на заданном уровне. В отличие от систем стабилизации, где задающее воздействие постоянно, и систем программного управления, где оно изменяется по заранее заданному закону, в следящих системах задающее воздействие изменяется по закону, заранее не известному.

При управлении станком вручную (рис. 319) рабочий, зная программу управления, постоянно следит глазами (обратная связь) за ее точным выполнением, управляя перемещениями стола с деталью.

При применении следящей системы (рис. 320) управляемый рабочий орган 7 (например, шпиндельная бабка с фрезой) с помощью силового следящего привода 6 (например, гидроцилиндра

с поршнем) автоматически воспроизводит движение, задаваемое управляющим устройством 1 (например, копиром). Сигнал управления вырабатывается сравнивающим устройством 2, получающим информацию о требуемом положении рабочего органа 7 от управляющего устройства 1 и о его действительном положении с помощью отрицательной обратной связи 9. Последняя называется так, потому что управляющий сигнал ϵ (сигнал рассогласования) представляет собой разность сигналов $x_{\text{зад}}$ и x , характеризующих соответственно заданное и действительное перемещения рабочего органа станка.

На силовой следящий привод помимо реакции со стороны рабочего органа станка (процесс резания, силы трения) действует внешнее возмущение f .

Сигнал рассогласования ϵ усиливается в усилителе 3 и преобразуется с помощью корректирующих устройств 4 и 8 в управляющий сигнал z . Устройство 4 принято называть последовательным корректирующим устройством, а устройство 8 — параллельным. Корректирующие устройства предназначены для обеспечения работоспособности и требуемой точности и быстродействия следящей системы. Сигнал z через усилитель мощности 5 передается на силовой следящий привод, в качестве которого в станках широко применяют электродвигатели постоянного тока и гидроприводы (гидроцилиндр с поршнем или гидродвигатель).

Следящие системы управления могут быть непрерывными и дискретными, а также линейными и нелинейными. Линейной системой называется система, динамика всех звеньев которой описывается линейными уравнениями. Для этого необходимо, чтобы статические характеристики всех звеньев системы

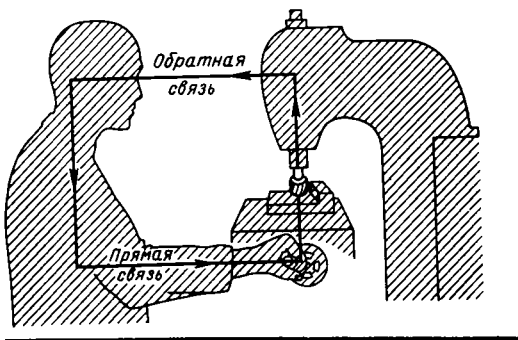


Рис. 319. Схема управления обработкой детали вручную

были линейными. Нелинейной называется такая система, в которой хотя бы в одном звене нарушается линейность статической характеристики или же имеет место любое другое нарушение линейности уравнений динамики звена. Реальные звенья следящих систем управления почти всегда имеют нелинейные характеристики, обусловленные ограничением мощности, гистерезисом, силами сухого трения, зазорами в кинематических цепях привода подачи.

Учитывая, что наиболее полно разработана методика расчета для обыкновенных линейных систем, для простоты анализа и синтеза следящих систем управления нелинейные характеристики их реальных звеньев стараются линеаризовать. В основе линеаризации нелинейных уравнений лежит предположение, что в исследуемом динамическом процессе переменные изменяются так, что их отклонение от установившихся значений остаются все время достаточно малыми.

При проектировании и эксплуатации систем решают одну из двух задач — задачу анализа следящей системы управления или задачу ее синтеза. В первом случае задаются следящая система и значение ее параметров, требуется определить свойства системы. Во втором случае, наоборот, задаются свойства, которыми должна обладать система управления, и необходимо создать такую систему. Очевидно, что задача синтеза много сложнее задачи анализа из-за своей неоднозначности.

В общем виде порядок исследования следящей системы управления в обоих случаях включает математическое описание системы, исследование ее уста-

новившихся и переходных режимов. Математическое описание следящей системы управления начинается с разбиения ее на звенья и описания этих звеньев. Последнее может осуществляться либо аналитически в виде уравнений, связывающих входные и выходные величины звена, либо графически в виде характеристик, описывающих ту же связь. По уравнениям или характеристикам отдельных звеньев составляют уравнения или характеристики системы в целом, на основании которых она исследуется.

После разбиения системы на звенья и их математического описания составляют структурную схему системы управления.

При разработке математической модели следящей системы управления следует обязательно учитывать динамику ее механической части — привода подач от выходного вала двигателя до рабочего органа станка. Аналитическую связь между входной и выходной величиной звена дает передаточная функция. Следящую систему можно рассматривать как комбинацию динамических звеньев с определенными типовыми передаточными функциями.

Улучшение свойств и повышение точности работы следящей системы производится изменением ее параметров или, если это необходимо, ее структуры — введением дополнительных корректирующих средств. В следящих системах управления станками в качестве таких средств наиболее рационально применять обратные связи, которые технически легко реализуются и имеют свойство уменьшать влияние нелинейностей тех участков цепи, которые ими охваты-

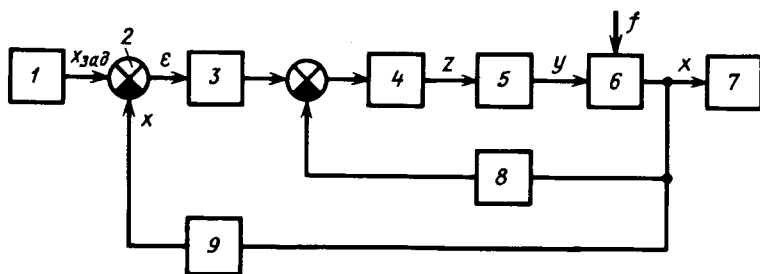


Рис. 320. Функциональная схема следящей системы управления

ваются. Кроме того, они снижают сумму постоянных времени звеньев, входящих в систему управления, и увеличивают быстродействие.

Динамические свойства линейных звеньев и системы управления в целом могут быть описаны уравнениями и графическими характеристиками — переходными и частотными. Если входное воздействие в следящей системе возникло внезапно, то в ней происходит переходный процесс, который постепенно переходит в установившийся режим работы (рис. 321).

В нелинейных системах возможны автоколебания, т. е. устойчивые свободные колебания с постоянной амплитудой при отсутствии внешних колебательных воздействий.

Поведение следящей системы во время переходных и установившихся режимов работы можно косвенно характеризовать ее амплитудной и фазовой частотными характеристиками (см. рис. 100).

Частотные характеристики определяют режим установившихся вынужденных колебаний системы (амплитуду и фазу) в зависимости от амплитуды и частоты поданного на ее вход гармонического воздействия. Амплитудная частотная характеристика АЧХ (см. рис. 100,б) по мере увеличения частоты из-за инерционности звеньев в конце концов становится равной нулю. Чем менее инерционно звено, тем длиннее его амплитудная частотная характеристика, т. е. тем больше полоса пропускаемых системой частот.

Фазовая частотная характеристика (ФЧХ) у обычных инерционных звеньев отрицательна ($\varphi < 0$), т. е. выходные колебания отстают по фазе от входных,

и это отставание растет с увеличением частоты (см. рис. 100,в). АЧХ и ФЧХ можно объединить в одну амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ), используя $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ в качестве полярных координат (см. рис. 100,г). Каждая точка амплитудно-фазовой частотной характеристики соответствует определенному значению частоты ω . При исследовании следящей системы управления амплитудную и фазовую частотные характеристики удобно строить в логарифмических координатах.

Важнейшими показателями работоспособности и качества следящей системы управления является устойчивость ее работы, точность и быстродействие. Устойчивость определяет работоспособность системы, а быстродействие влияет на динамическую точность и производительность станка. Под устойчивостью следящей системы управления понимается ее способность возвращаться к установившемуся состоянию после прекращения воздействий, которые вывели систему из этого состояния.

Инерционность объекта управления, а также наличие некоторого запаздывания при прохождении сигнала по цепям следящей системы обуславливает возможность возникновения колебаний в системе. Амплитуда этих колебаний может уменьшаться или увеличиваться. Если, например, трение в направляющих и подшипниках будет велико, колебания будут затухающими (см. рис. 321), а система устойчивой. Но если энергия, поступающая по цепи обратной связи, окажется достаточной для преодоления сил трения с некоторым запасом, амплитуда колебаний будет

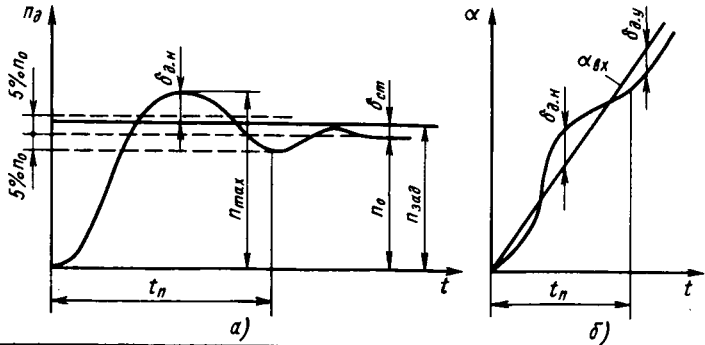


Рис. 321. Графики переходных процессов в следящей системе управления:

а — при ступенчатом изменении n_d ; б — при повороте входного вала на угол α_{vx} с постоянной скоростью

нарастать, объект управления будет раскачиваться все сильнее, и система будет неустойчивой. О степени устойчивости системы судят по ее поведению в переходном процессе, по величине перерегулирования

$$\sigma = \frac{n_{\max} - n_0}{n_0} 100 \%,$$

где $n_{\max}$ и n_0 — соответственно максимальное и установившееся значения регулируемой величины.

Используют также частотные методы определения критерия устойчивости системы (критерии устойчивости Рауса — Гурвица, Михайлова и Найквиста).

Точность следящей системы характеризуется величинами статической $\delta_{\text{ст}}$ и динамической $\delta_{\text{д}}$ ошибок (рис. 321). Статической ошибкой $\delta_{\text{ст}}$ является ошибка, получаемая по окончании отработки входного сигнала $n_{\text{зад}}$ при неподвижном выходном вале следящего привода подачи. Она складывается из ошибок датчика обратной связи; кинематических погрешностей передаточных механизмов; ошибок от помех, дрейфа нулей и нечувствительности электронных и других усилителей мощности; ошибок, возникающих в статике под действием нагрузки на управляемый рабочий орган станка.

Динамическая ошибка может быть установившейся $\delta_{\text{д.у}}$ и неустановившейся (переходной) $\delta_{\text{д.н}}$ (см. рис. 321). Ошибка, измеренная в установившемся режиме, когда выходной вал вращается с постоянной скоростью, равной скорости, задаваемой на входе (угол поворота входного вала $\alpha_{\text{вх}}$), называется установившейся динамической ошибкой $\delta_{\text{д.у}}$. Ошибка, измеряемая в переходном процессе, когда выходной вал системы движется с ускорением (замедлением), стремясь к установившейся скорости (к полной остановке), называется неустановившейся (переходной) динамической ошибкой $\delta_{\text{д.н}}$. Очевидно, что с течением времени эта ошибка меняется, стремясь к некоторому установившемуся значению $\delta_{\text{д.у}}$, если переходный процесс заканчивается движением с постоянной установившейся скоростью, или к значению $\delta_{\text{ст}}$, если переходный процесс заканчивается остановкой системы.

Для уменьшения степени влияния

динамической погрешности следящей системы на точность воспроизведения заданного контура детали требуется высокое быстродействие системы управления. Неблагоприятная форма кривой переходного процесса с большим перерегулированием является причиной возникновения дополнительной погрешности слежения и недопустимых динамических сил, действующих на кинематические цепи станка. Быстродействие следящей системы управления характеризуется временем переходного процесса $t_{\text{п}}$ (см. рис. 321).

Следящие системы управления широко применяют в станкостроении. На их основе построены различные типы следящих копировальных систем и систем числового программного управления замкнутого типа.

§ 2. Особенности проектирования следящих систем управления

Проектирование следящих систем сводится к нахождению компромиссного решения между стремлением получить высокое качество работы системы и стремлением достигнуть этого качества более простыми техническими средствами.

Исходными данными для проектирования системы управления являются параметры объекта регулирования; требования, предъявляемые к статическим, динамическим, энергетическим и конструктивным характеристикам системы; условия ее эксплуатации. При составлении задания на проектирование целесообразно определить предельные и наиболее ответственные режимы ее работы, типовые входные воздействия, существующие ограничения и др. Проектирование начинается с выбора и теоретического обоснования критериев, которым должна удовлетворять система: быстродействие, точность слежения при достаточной степени стабильности всех других характеристик.

Одним из наиболее ответственных этапов проектирования является выбор силового исполнительного привода подачи. Выбор должен сопровождаться предварительной оценкой динамических свойств следящей системы с этим приводом. Выбор исполнительного привода предопределяет тип и мощность источников энергии, номенклатуру основных функционально необхо-

димых элементов; предварительную структурную схему и дифференциальное уравнение движения без учета добавочных корректирующих средств.

Далее определяются параметры дифференциального уравнения следящей системы, обеспечивающей воспроизведение заданной траектории движения. Порядок дифференциального уравнения движения следящей системы и характеристики данного уравнения становятся известными после определения типа функционально необходимых элементов, входящих в состав системы, и вида предварительно составленной структурной схемы.

Следующим этапом проектирования является определение типа и минимального числа корректирующих средств, а также их параметров, обеспечивающих оптимальные значения статических и динамических характеристик системы управления. При этом предпочтение рекомендуется отдавать отрицательным обратным связям.

Спроектированная следящая система должна быть подвергнута поверочному анализу. При этом рекомендуется использовать электронные моделирующие устройства. Если спроектированная следящая система нелинейна, необходимо при ее анализе определить возможность возникновения автоколебаний. Последовательность этапов проектирования следящей системы управления может меняться и зависит от конкретных условий ее проектирования.

Работа следящих систем управления станками имеет ряд особенностей. Эти системы воспроизводят заданную траекторию движения, аппроксимированную линейными отрезками или отрезками весьма плавных кривых. Поступающие на вход системы управляющие воздействия поддаются расчету, и поэтому их можно считать известными. Наиболее характерные установившиеся режимы работы следящих систем возникают при воспроизведении линейных участков заданной траектории или синусоидальных траекторий с весьма малой угловой частотой ω . Наиболее характерные переходные режимы работы следящих систем возникают при воспроизведении ступенчатой траектории или траектории, образованной двумя пересекающимися линейными участками. Основной нагрузкой во время работы являются силы

резания. Кинематические цепи приводов подач станков должны иметь максимально возможную жесткость, быть беззазорными и иметь высокий КПД. Тогда собственные колебания кинематических цепей и зазоры в этих цепях можно не учитывать при анализе и синтезе следящих систем.

§ 3. Следящие копировальные системы управления

В основу работы следящих копировальных систем управления заложен принцип работы следящих систем управления, рассмотренных в гл. 38, § 1 (см. рис. 320).

Программа управления в этих системах воплощается в аналоговом виде, в форме копира, представляющего собой прототип детали или ее частей. Копир является программоносителем для этих систем. В качестве программоносителя применяют иногда первую деталь, обработанную при управлении вручную.

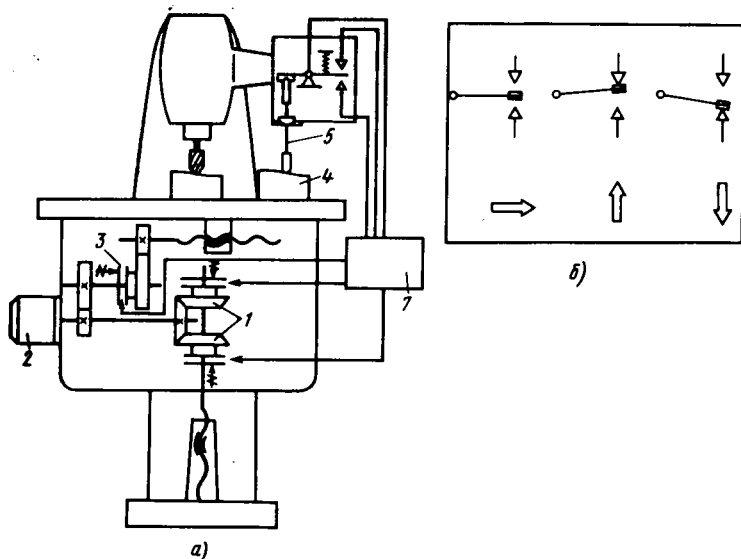
В отличие от механических копировальных систем (см. рис. 309), где копир выполняет две функции — управления перемещением рабочего органа и его подачи, в следящих копировальных системах копир выполняет только функцию управления, а функцию рабочей подачи выполняет силовой следящий привод. Это позволяет изготавливать копии из легкообрабатываемых материалов, снижать их износ и тем самым повышать точность обработки.

Задание программы управления копиром позволяет осуществлять непрерывное управление обработкой деталей с прямолинейным и криволинейным плоским и объемным профилем.

Формообразование на станках со следящими копировальными системами управления может осуществляться двумя методами: 1) путем обхода копира 4 (рис. 322) при включении и выключении движений подач от электродвигателя 2 на короткие промежутки времени с помощью электромагнитных муфт 1 и 3 (рис. 322,а), которые включаются или отключаются замыканием или размыканием контактов (рис. 322,б) при подъеме или опускании шупа 5 (система включено — выключено); б) путем обхода копира при непрерыв-

Рис. 322. Следящая система:

а — общая схема; б — положение контактов



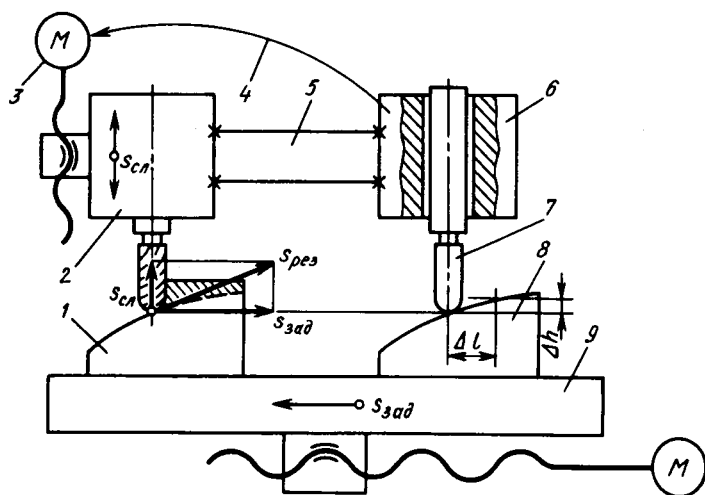
ном регулировании соотношения скоростей подачи — методом слежения (рис. 323).

Управляющее воздействие следящей системе (рис. 323) задается копиром 8, установленным вместе с заготовкой 1 на столе 9 станка, имеющем постоянную задающую подачи $s_{зад}$. По поверхности копира скользит шуп 7 копировального прибора 6.

Перемещаясь вверх на величину Δh при перемещении стола на величину Δl , вниз или отклоняясь на небольшой угол шуп 7 задает управляющее воздей-

ствие (входной сигнал $x_{зад}$ на рис. 320). Шпиндельная бабка 2 (см. рис. 323) с инструментом через жесткую обратную связь 5 соединена с корпусом копировального прибора 6, положение которого характеризует действительное положение управляемого объекта (выходной сигнал x на рис. 320). Датчик, находящийся в копировальном приборе 6 (см. рис. 323), измеряет рассогласование в положении шупа и фрезы и вырабатывает сигнал управления 4 (сигнал рассогласования ϵ на рис. 320), который после его усиления и коррек-

Рис. 323. Структурная схема следящей копирующей системы управления



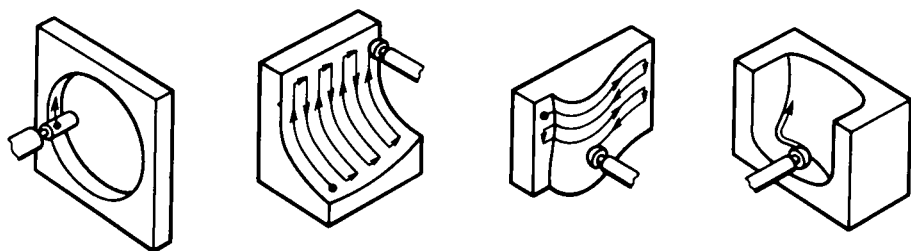


Рис. 324. Примеры деталей, обрабатываемых на копировально-фрезерных станках

ции посылается на силовой следящий привод 3 (см. рис. 323), обеспечивающий следящую подачу $s_{сд}$ шпиндельной бабке станка. Профиль обрабатываемой детали образуется путем геометрического сложения двух взаимно перпендикулярных перемещений: движения стола с задающей подачей $s_{зад}$ и движения шпиндельной бабки с фрезой со следящей подачей $s_{сд}$. Система управления следит за перемещением и воспроизводит перемещение фрезы с результирующей подачей $s_{рез}$, обрабатывающей на заготовке точную копию профиля установленного копира.

В станкостроении применяют различные виды следящих копировальных систем: электрические, гидравлические, электрогидравлические, пневмогидравлические и др. Следящими копировальными системами управления оснащаются токарные, фрезерные и другие

типы станков (например, мод. 1Б732, 6Б444, 6445, 6М42К и др.) для обработки деталей типа ступенчатых валов, кулачков, шаблонов, ковочных и вырубных штампов, кокилей, металлических моделей, пресс-форм и др. (рис. 324).

Примером электрической следящей копировальной системы является схема копировального прибора с индуктивным датчиком, показанная на рис. 325.

Щуп 2 благодаря шарнирной опоре 3 может перемещаться копиром 1 в осевом направлении и отклоняться на небольшой угол. На конце щупа и на качающемся рычаге 5 имеются конические гнезда, куда помещен шарик 4. Благодаря этой опоре отклонение рычага 5 происходит не только при осевом смещении щупа 2, но и при его угловом отклонении. На конце рычага 5 установлен якорь 6, расположенный между двумя сердечниками 7 дифференциального трансформатора. На первичную обмотку трансформатора подается напряжение, а со вторичной снимается управляющее напряжение (сигнал рассогласования) при отклонении якоря 6 от среднего положения вправо или влево.

Схема простейшей гидравлической следящей копировальной системы показана на рис. 326. Щуп 3, связанный со следящим распределителем, скользит по поверхности копира 2, установленного вместе с заготовкой 8 на столе 1, имеющем задающую подачу $s_{зад}$. В среднее окно корпуса распределителя насос подает масло под давлением p_n , а через верхнее и нижнее окна происходит слив масла. Следящая подача $s_{сд}$ шпиндельной бабки 7 с фрезой

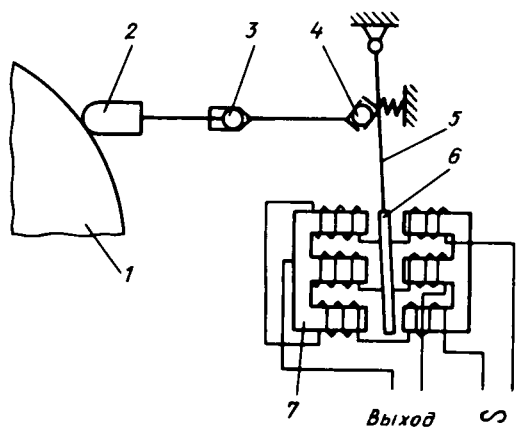
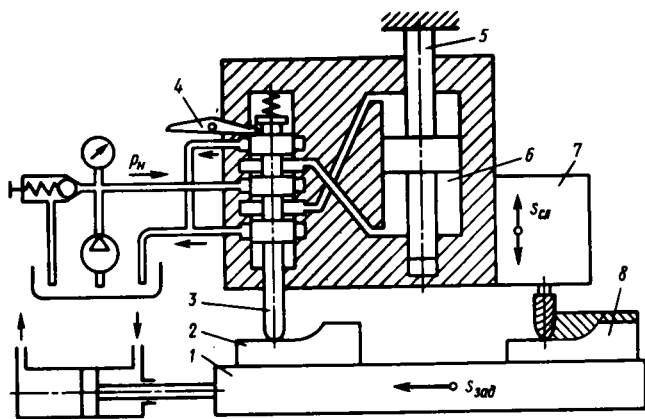


Рис. 325. Схема копировального прибора с индуктивным датчиком

Рис. 326. Схема гидравлической следящей копирующей системы



обеспечивается следящим гидроцилиндром 6, поршень со штоком 5 которого закреплен на колонне станка.

На горизонтальном участке копира, когда рассогласования нет, распределитель находится в среднем положении. При этом закрыта подача масла от насоса (p_n) и закрыт слив масла из обеих полостей силового следящего гидроцилиндра с поршнем. В результате в этом положении $s_{сш}=0$. При перемещении шупа с распределителем вверх или вниз открывается подача масла под давлением соответственно в верхнюю или нижнюю полость гидроцилиндра. Шпиндельная бабка с фрезой будет соответственно подниматься или опускаться. Перемещения шпиндельной бабки, совершаемые по команде следящего распределителя, немедленно передаются ему же с помощью обратной связи, осуществляемой в данном случае закреплением корпуса следящего распределителя непосредственно со шпиндельной бабкой. Обратная связь ослабляет командный сигнал распределителя, снижая его до нуля при среднем положении золотника. Для отвода фрезы от заготовки и шупа от копира вручную служит рукоятка 4.

Описание гидравлических следящих копирующих систем управления, их построение и расчет приведены в книге [31].

Необходимость преобразования информации чертежа детали и изготовление на ее основе физического аналога — копира, большая трудоемкость его изготовления определили задачу использования в качестве программноносителя непосредственно черте-

жа детали. Системами с таким программноносителем являются фотокопировальные следящие системы управления. Их применяют для обработки плоских деталей на фрезерных станках, а также на гравировальных станках, газорезательных машинах и др.

Считывание программы управления (слежение за линией чертежа детали) производится фотоэлектрической головкой (рис. 327), от которой сигналы управления поступают на силовые следящие приводы (электродвигатели постоянного тока). Отраженный от плоскости чертежа 1 свет, излучаемый источником 2 света, попадает через объектив 3 на металлическую диафрагму 4 с круглым отверстием 5, расположенным с эксцентриситетом относительно оси вращения (являющейся также оптической осью) синхронного двигателя 6 с полым валом 7.

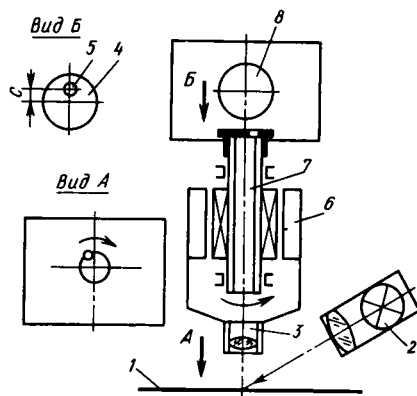


Рис. 327. Схема работы фотоэлектрической головки

Дизмстр светового отверстия, толщина линии чертежа и расстояние от объектива до плоскости чертежа выбираются с таким расчетом, чтобы изображение линии чертежа в плоскости диафрагмы полностью закрывало световое отверстие. При этом условии за каждый оборот синхронного двигателя световое отверстие 2 раза пересекает изображение линии, что вызывает затемнение фотозлемента 8 и, следовательно, изменение фототока (также дважды за один оборот). Эти два импульса фототока используются в качестве первичных сигналов для управления корректирующей и электрической системами, последняя из которых следит за углом наклона копируемого контура [51].

Линия контура чертежа, используемого в фотокопировальных системах, должна быть не шире 0,2 мм; края линии контура не должны иметь резких

утолщений и размылов; фон чертежа должен быть ровным непосредственно около линии, без грязи и царапин; на чертеже не должно быть линий, пересекающих основной контур.

Как видно из рассмотрения принципа работы и характеристики фотокопировальных систем управления, замена копира чертежом детали не приносит больших преимуществ, так как не решается принципиальный вопрос — использование для управления непосредственно числовой информации чертежа детали. В этих системах имеем в качестве программносителя физический аналог (контур детали), изготовление которого также трудоемко. При изготовлении возможны погрешности вычерчивания, которые переносятся на обрабатываемую деталь.

Поэтому фотокопировальные системы управления широкого применения (особенно для обработки точных деталей) не получили.

Глава 39 Системы числового программного управления

§ 1. Основные принципы числового программного управления станками

Развитие электроники и вычислительной техники, внедрение в производство ЭВМ привело к разработке и широкому применению в станкостроении систем числового программного управления (ЧПУ) металлорежущими станками, а также другим технологическим оборудованием.

Числовым программным управлением металлорежущими станками называют управление по программе, заданной в алфавитно-цифровом коде и представляющей последовательность команд, записанную на определенном языке и обеспечивающую заданное функционирование рабочих органов станка.

Принципиальное отличие систем ЧПУ от ранее рассмотренных САУ заключается в способе расчета и задания программы управления и ее передачи для управления рабочими органами станка. Информация чертежа детали представлена в аналогово-цифровом ви-

де, т. е. в виде чисел, условно-графических изображений, различных словесных указаний, условных знаков и других символов, имеющих ограниченное число значений, каждое из которых несет вполне определенную и однозначную информацию.

В обычных САУ программа управления воплощается в физические аналоги — кулачки, копиры, упоры, кондукторные плиты и другие средства, которые являются программносителями (рис. 328,а). Данный способ задания программы управления имеет два основных недостатка. Первый вызван тем, что информация чертежа детали из цифровой (дискретной) и однозначной превращается в аналоговую (в виде кривых кулачка, копира). Это приводит к погрешностям, вносимым при изготовлении кулачков, копиров, расстановки путевых упоров на линейках, а также при износе этих программносителей в процессе эксплуатации. Вторым недостатком является необходимость изготовления данных программносителей с последующей трудоемкой наладкой на станке. Это

приводит к большим затратам средств и времени и делает в большинстве случаев неэффективным применение обычных САУ для автоматизации серийного и особенно мелкосерийного производства.

В системах ЧПУ на всем пути подготовки программы управления вплоть до ее передачи рабочим органам станка мы имеем дело только с информацией в цифровой (дискретной) форме, полученной непосредственно из чертежа детали (рис. 328,б). Траектория движения режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки в станках с ЧПУ представляется в виде ряда его последовательных положений, каждое из которых определяется числом. Вся информация программы управления (размерная, технологическая и вспомогательная), необходимая для управления обработкой детали, представленная в текстовой или табличной форме с помощью символов (цифр, букв, условных знаков), кодируется (код ISO—7BIT) и пробивается на восьмидорожковой перфоленке или вводится в память системы управления непосредственно с помощью клавишей на пульте управления. Устройство ЧПУ преобразует эту информацию в управляющие команды для исполнительных механизмов станка и контролирует их выполнение.

Поэтому в станках с ЧПУ стало возможным получать сложные движения его рабочих органов не за счет кинематических связей, а благодаря управлению независимыми координатными перемещениями этих рабочих органов по программе, заданной в числовом виде. Качественно новым в станках с ЧПУ является возможность увеличения числа одновременно управляемых координат, в результате чего стало возможным применить принципиально новые компоновки станков с получением широких технологических возможностей при автоматическом управлении.

Абстрактный и однозначный характер информации, передаваемой на всем пути от чертежа до рабочих органов станка, позволил применить для станков с ЧПУ математические методы подготовки программы управления, автоматизировать процесс ее расчета и составления на основе применения ЭВМ и при необходимости делать это централизованно. Применение ЭВМ позволяет выбирать оптимальный процесс обработки (последовательность переходов, режимы резания и др.). В результате снижается трудоемкость и ускоряется процесс подготовки программы управления и производства в целом. Перфоленки могут быть размножены в необходимом количестве, их хранят в биб-

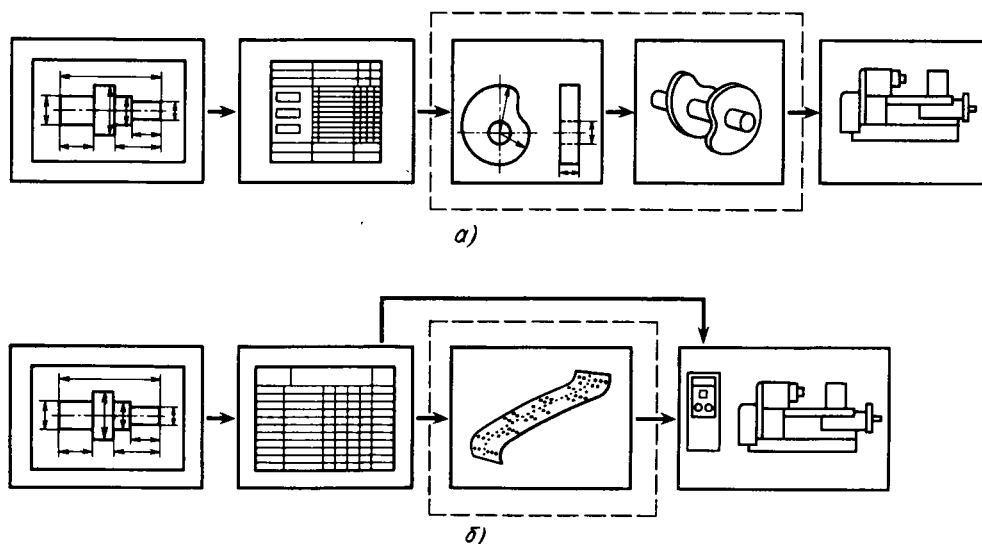


Рис. 328. Процесс преобразования информации:
а — в обычных САУ; б — в системах ЧПУ

ЧПУ, кадр может содержать команды служебного назначения.

При подготовке программы управления размеры перемещений рабочих органов станка с ЧПУ задают двумя способами: 1) в абсолютных значениях; 2) в виде приращений. В первом случае все координаты определяются относительно координат некоторой нулевой точки, называемой нулем отсчета координат, остающейся фиксированной (постоянной) для всей программы обработки детали. В результате отсутствует накопление ошибок позиционирования. Во втором случае все координаты определяются относительно координат предыдущего положения рабочего органа станка. Точность положения последнего при этом зависит от точности отработки координат всех предыдущих опорных точек, в результате чего может происходить накопление ошибок.

Запись информации на перфоленту производится на перфораторах. Наибольшее распространение получили перфораторы, управляемые от стандартной клавиатуры пишущей машинки. Использование этих перфораторов обеспечивает преобразование буквенно-цифрового кода в комбинации отверстий на перфоленте. При нажатии клавиши перфорируется сразу вся строка. Такие устройства обеспечивают скорость записи информации до 400 строк/с.

Для выявления ошибок при записи информации, вызванных невнимательностью оператора или отказом перфоратора, в этих устройствах предусмотрено возможность печати контрольного бланка. Для обеспечения совмести-

мости процесса программирования для различных станков с ЧПУ в нашей стране и за рубежом приняты рекомендации международного стандарта (ISO 841—74), регламентирующего направления осей координат и поворотов вокруг них. За основу принята система координат X, Y, Z , оси которой указывают положительные направления перемещения режущих инструментов относительно неподвижной детали (рис. 330). Если деталь движется относительно неподвижного инструмента, то ее положительные перемещения направлены в обратные стороны. Ось X всегда располагают горизонтально, а ось Z совмещают с осью вращения инструмента или шпинделя на токарных станках. Круговые перемещения режущих инструментов обозначают буквами A, B, C . За положительное принято вращение по часовой стрелке при взгляде вдоль положительного направления соответствующей координатной оси. На рис. 331 показана последовательность этапов по подготовке процесса обработки детали на станке с ЧПУ.

Общая укрупненная структурная схема системы ЧПУ показана на рис. 332. Она включает следующие основные элементы: устройство ЧПУ; приводы подач рабочих органов станка и датчики обратной связи (ДОС), установленные по каждой управляемой координате. Устройство ЧПУ предназначено для выдачи управляющих воздействий рабочим органам станка в соответствии с программой управления, вводимой на перфоленте. Программа управления считывается последовательно в пределах одного кадра с запоминанием в

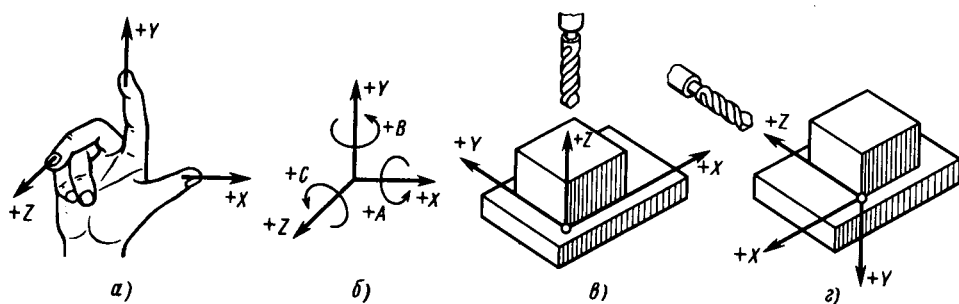


Рис. 330. Система координат станков с ЧПУ:

а — правило правой руки при определении координатных осей; б — система координат и поворотов вокруг них; в, г — соответственно системы координат для станков с вертикальной и горизонтальной компоновкой шпинделя

блоке памяти, откуда она подается в блоки технологических команд, интерполяции и скоростей подач.

Блок технологических команд служит для управления цикловой автоматикой станка, состоящей в основном из исполнительных элементов типа пускателей, электромагнитных муфт, соленоидов, концевых и путевых выключателей, реле давления и т. д., обеспечивающих выполнение различных технологических команд (смены инструмента, переключения частот вращения шпинделя и др.), а также различных блокировок при работе станка.

Блок интерполяции — специализированное вычислительное устройство (интерполятор) — формирует частичную траекторию движения инструмента между двумя или более заданными в программе управления точками. Выходная информация с этого блока, поступающая на блок управления приводами подач, обычно представлена в виде последовательности импульсов по каждой координате, частота которых определяет скорость подачи, а число — величину перемещения. Заданная скорость подачи вдоль обрабатываемого контура детали, а также процессы разгона и торможения обеспечиваются блоком скоростей подач. Блок коррекции программы служит для изменения запрограммированных параметров обработки: скорости подачи и размеров инструмента (длины и диаметра). Ввод коррекций осуществляется с пульта управления и индикации, который служит для связи оператора с системой ЧПУ. Блок постоянных циклов позволяет упростить процесс программирования и сократить длину перфоленты при обработке повторяющихся элементов детали, например при сверлении и растачивании отверстий, нарезании резьбы и др.

Привод подач рабочих органов состоит из приводного двигателя, систем его управления и кинематических звеньев. Точность перемещения рабочих органов станка с ЧПУ зависит от применяемой схемы управления приводами подач: разомкнутой (без системы измерения действительных перемещений управляемого рабочего органа) или замкнутой (с системой измерения). Во втором случае контроль точности отработки управляющих сигналов по каждой управ-

ляемой координате станка осуществляется ДОС. Точность данного контроля во многом определяется типом, конструкцией и местом установки датчиков на станке.

Анализируя процесс использования информации I , содержащейся в чертеже детали, при ее изготовлении на станке с ЧПУ (см. гл. 36, § 2) необходимо отметить, что в этом случае технолог-программист получает возможность передавать ее почти всю в виде слагаемых I_c и I_p (доля информации, переносимая на деталь с использованием числового программного управления) при минимальных значениях слагаемых I_v и I_m . Таким образом, при применении системы ЧПУ имеем высокую степень автоматизации, когда

$\alpha = \frac{I_c + I_p + I_v}{I_c + I_p + I_v + I_m} \rightarrow 1$, и при широких технологических возможностях высокую

мобильность, когда $\beta = \frac{I_c + I_p}{I_c + I_p + I_v} \rightarrow 1$

Особое значение здесь приобретает доля информации I_p , и если процесс программирования не автоматизирован, для подготовки программы управления приходится затрачивать много труда. Поэтому при применении станков с ЧПУ необходима автоматизация процесса программирования на основе применения ЭВМ.

§ 2. Классификация систем ЧПУ

Системы ЧПУ можно классифицировать по различным признакам.

1. Исходя из технологических задач управления обработкой все системы ЧПУ делят на три группы (рис. 333): позиционные, контурные и комбинированные.

Позиционные системы ЧПУ обеспечивают управление перемещениями рабочих органов станка в соответствии с командами, определяющими позиции, заданные программой управления. При этом перемещения вдоль различных осей координат могут выполняться одновременно (при заданной постоянной скорости) или последовательно. Данными системами оснащают в основном сверлильные и расточные станки для обработки деталей типа плит, фланцев, крышек и др., в которых производится сверление, зенкерова-

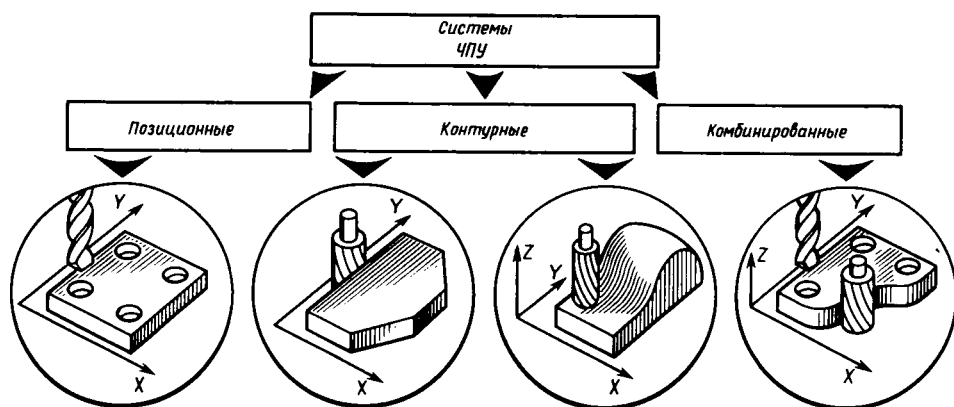


Рис. 333. Классификация систем ЧПУ исходя из технологических задач управления обработкой

ние, растачивание отверстий, нарезание резьбы и др. (например, мод. 2Р135Ф2, 6902МФ2, 2А622Ф2-1).

Контурные системы ЧПУ обеспечивают управление перемещениями рабочих органов станка по траектории и с контурной скоростью, заданными программой управления. Контурной скоростью является результирующая скорость подачи рабочего органа станка, направление которой совпадает с направлением касательной в каждой точке заданного контура обработки. Контурные системы ЧПУ в отличие от позиционных обеспечивают непрерывное управление перемещениями инструмента или заготовки поочередно или сразу по нескольким координатам (рис. 333), в результате чего может обеспечиваться обработка очень сложных деталей (с управлением одновременно по более чем двум координатам). Контурными системами ЧПУ оснащены в основном токарные и фрезерные станки (например, мод. 16К20Ф3, 6Р13Ф3).

Комбинированные системы ЧПУ, сочетающие функции позиционных и контурных систем ЧПУ, являются наиболее сложными, но и более универсальными. В связи с усложнением станков с ЧПУ (особенно многооперационных), расширением их технологических возможностей и повышением степени автоматизации применение комбинированных систем ЧПУ значительно расширяется (например, мод. ИР500Ф4, 6305Ф4).

II. По наличию обратной связи все системы ЧПУ делят на две группы: разомкнутые и замкнутые.

Замкнутые системы ЧПУ в свою очередь могут быть: 1) с обратной связью по положению рабочих органов станка; 2) с обратной связью по положению рабочих органов и с компенсацией погрешностей станка; 3) самоприспособляющиеся (адаптивные).

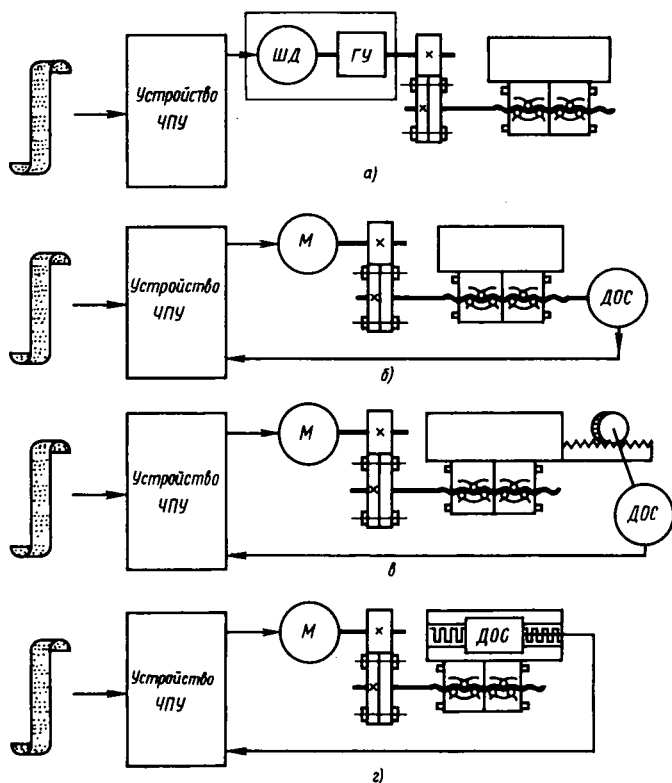
Разомкнутые системы ЧПУ строятся на основе силовых или несиловых шаговых двигателей (*ШД*). В последнем случае *ШД* применяется обычно в комплекте с гидроусилителем (*ГУ*) (рис. 334,а). Хотя эти системы являются наиболее простыми, в них из-за отсутствия контроля действительного положения рабочего органа станка, на точность перемещения будут влиять погрешности шагового электродвигателя, гидроусилителя и передаточных механизмов привода подачи (зубчатой передачи, пары винт — гайка и др.).

Системами ЧПУ разомкнутого типа оснащена значительная часть станков с ЧПУ (например, мод. 16К20Ф3, 6Р13Ф3, РТ-725Ф3, 6Р11Ф3, 1Б732Ф3).

В основе работы замкнутых систем ЧПУ лежит принцип следящих систем управления. В качестве приводного двигателя *М* в этих системах чаще всего используют электродвигатели постоянного тока.

Замкнутые системы ЧПУ первой подгруппы (с обратной связью по положению рабочего органа станка) могут

Рис. 334. Структурные схемы приводов подач станков с ЧПУ:
 а — разомкнутая; б — замкнутая с круговым ДОС на ходовом винте; в — замкнутая с круговым ДОС и реечной передачей; г — замкнутая с линейным ДОС



быть трех типов. В замкнутых системах ЧПУ первого типа (рис. 334,б) производится косвенное измерение положения рабочего органа с помощью кругового ДОС, установленного на ходовом винте. Данная схема достаточно проста и удобна с точки зрения установки ДОС. Габаритные размеры применяемого датчика не зависят от величины измеряемого перемещения. При применении круговых ДОС, устанавливаемых на ходовом винте, высокие требования предъявляются к точностным характеристикам передачи винт — гайка (точность изготовления, жесткость, отсутствие зазоров), которая в этом случае не охватывается обратной связью.

Применение в приводах подач станков с ЧПУ точно изготовленных шариковых винтовых пар и создание в них предварительного натяга для устранения зазоров и увеличения жесткости позволяют широко применять замкнутые системы ЧПУ первого типа (рис. 334,б) в станках с ЧПУ для получения высокой точности перемещения рабочих органов.

В замкнутых системах ЧПУ второго типа также используют круговой ДОС, но измеряющий перемещение рабочего органа станка (рис. 334,в) через реечную передачу. Хотя в данном случае система обратной связи охватывает все передаточные механизмы привода подачи, включая и передачу винт — гайка, в измерения вносится погрешность реечной передачи. Поэтому необходимо применять прецизионную реечную передачу с рейкой, длина которой зависит от величины хода рабочего органа станка. Это усложняет и удорожает систему обратной связи.

Замкнутые системы ЧПУ третьего типа оснащены линейными ДОС (рис. 334,г), обеспечивающими непосредственное измерение перемещения рабочего органа станка. Это позволяет охватить обратной связью все передаточные механизмы привода подачи, что обеспечивает высокую точность перемещений. Однако линейные ДОС сложнее и дороже, чем круговые; их габаритные размеры зависят от длины хода рабочего органа станка. На точность работы линейных ДОС могут влиять погрешно-

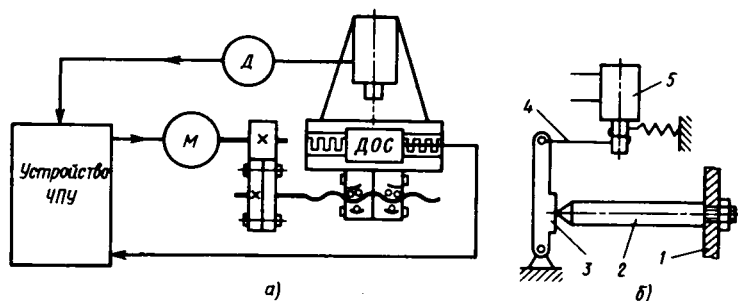


Рис. 335. Схема системы ЧПУ с компенсацией погрешностей станка:
а — структурная схема; б — устройство компенсации тепловых деформаций

сти станка (например, износ направляющих, тепловые деформации и др.).

Во всех трех типах рассмотренных замкнутых систем ЧПУ учитываются только погрешности привода подачи рабочих органов станка и не учитывают погрешности как самого станка (отклонение от прямолинейности направляющих и их износ, вибрации, тепловые деформации базовых деталей), так и других элементов технологической системы (упругие деформации, износ инструмента и др.), влияющие на точность обработки деталей.

Замкнутые системы ЧПУ второй подгруппы (рис. 335,а) для повышения точности обработки оснащены дополнительными системами обратной связи, с датчиками Д, компенсирующими погрешности станка (тепловые деформации, вибрации, износ направляющих и др.).

На рис. 335,б показана схема компенсации тепловых деформаций шпиндельной бабки многооперационного станка с ЧПУ фирмы «Olivetti» (Италия).

На кронштейне 1, установленном в шпиндельной бабке рядом со шпинделем, закреплен инваровый стержень 2, упирающийся в рычаг 3, расположенный в крайней левой части шпиндельной бабки и поджимаемый к стержню 2 пружиной через струну 4, обернутую на вал датчика 5. При работе станка и смещении передней части шпиндельной бабки со шпинделем вправо инваровый стержень, имеющий очень малый коэффициент линейного расширения, нагревается и смещается также

вправо, рычаг 3 отклоняется и датчик 5 выдает в систему управления сигнал для коррекции программы управления.

Существуют станки с ЧПУ, где производится компенсация других его погрешностей.

Замкнутые системы ЧПУ третьей подгруппы получили название самоприспосаблиющихся (адаптивных) систем управления. Благодаря наличию обратных связей не только по положению рабочих органов, но и по параметрам процесса обработки (упругие деформации технологической системы, износ инструмента, температура в зоне резания, вибрации), они обеспечивают автоматическое приспособление режима работы станка к изменяющимся условиям обработки (колебание припуска на заготовке, ее твердости и др.) для получения заданной точности обработки, максимально возможной производительности или минимальной себестоимости обработки (см. рис. 308,в).

Несмотря на относительно малый срок применения систем ЧПУ, они в своем развитии уже прошли несколько этапов, определяемых уровнем развития электронной техники. При этом разработчики систем ЧПУ использовали различные элементные базы: релейно-контакторную, транзисторную, микросхемы малой и средней степени интеграции, мини-ЭВМ и, наконец, микропроцессорные наборы и большие интегральные схемы памяти (БИС-памяти).

Широко применяемые в настоящее время в промышленности системы ЧПУ класса NC (Numerical Control) построены по принципу цифровой модели, где все операции, составляющие алгоритм

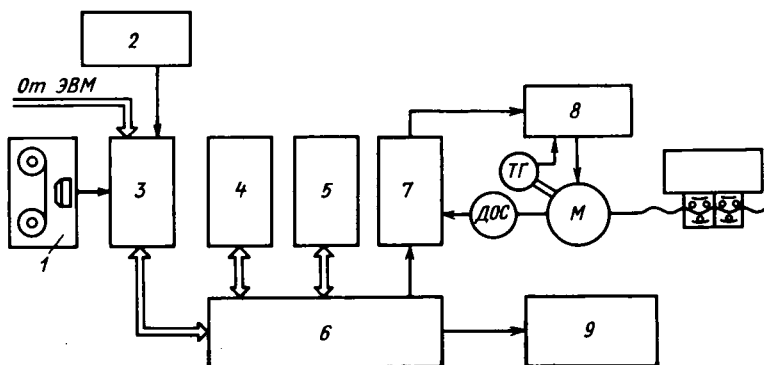


Рис. 336. Структурная схема системы ЧПУ класса CNC:

1 — блок считывания; 2 — пульт управления и индикации; 3 — блок ввода; 4 — постоянное запоминающее устройство (запоминаются программы декодирования, интерполяции и др.); 5 — оперативное запоминающее устройство (запоминаются величины коррекции, программа обработки и др.); 6 — центральное арифметическое устройство; 7 — блок управления приводом (импульсно-фазовый преобразователь и др.); 8 — блок управления приводами подачи; 9 — блок согласования со станком; ТГ — тахогенератор; ДЭС — датчик обратной связи

работы, выполняются параллельно с помощью отдельных цепей или устройств (блоков), реализующих ту или иную функцию (агрегатно-блочное построение). Данные системы ЧПУ называются системами с жесткой структурой.

Отечественная промышленность выпускает базовые модели таких систем (системы типа Н22, Н33), построенные на микроэлектронной базе. Однако при усложнении задач управления увеличивается число составляющих блоков, что удорожает систему ЧПУ. Весьма ограничены на этих системах возможности вмешательства оператора в процесс отработки заданной программы управления.

Если эти системы оснащены расширенным электронным устройством для запоминания программ (системы класса SNC — Stored Numerical Control), то устройство для считывания программы управления с перфоленты применяется только один раз — для ввода программы управления в электронный запоминающий блок. В результате повышается надежность работы станка с ЧПУ из-за сокращения его простоев по причине отказов фотосчитывающего устройства и самой перфоленты.

Разработка систем ЧПУ с использованием мини-ЭВМ, а затем микропроцессоров и БИС-памяти, получивших название систем класса CNC (Computer Numerical Control), привела к коренным изменениям в технике программного управления станками (рис. 336).

Особенностью систем управления класса CNC является их структура, соответствующая структуре управляющей ЭВМ, включающая вычислительное устройство (процессор), блоки памяти и ввода-вывода информации. При этом объем функций, характер проводимых операций и их последовательность определяются не специальными схемами, как было раньше в системах класса NC, а специальными программами функционирования, которые вводятся в блок памяти устройства и хранятся там постоянно или до замены. Переработка исходной информации, содержащейся в программе управления, ведется в соответствии с программами функционирования. Согласно этим же программам формируются команды на приводы подачи станка и его электроавтоматику.

С появлением систем класса CNC значительно расширились функциональные возможности программного управления, появились функции, которые раньше не могли быть реализованы: хранение программы управления и ее редактирование непосредственно на рабочем месте, расширенные возможности индикации на дисплее, диалоговое общение с оператором, широкие возможности коррекции, в том числе и погрешностей станка, развитая система диагностики неисправностей, возможность изменения программным способом функций системы управления в процессе ее эксплуатации, реализации функций электроавтоматики и др.

Первое поколение систем ЧПУ класса CNC было построено на базе универсальных мини-ЭВМ. Мини-ЭВМ в системе ЧПУ сохраняла свою универсальность в обработке данных и ориентировалась на решение задач программного управления путем соответствующего математического обеспечения, вводимого в виде программ с перфоленты в память системы. Данные системы ЧПУ получили название систем со свободно программируемыми алгоритмами. Их недостатком является высокая стоимость.

Системы ЧПУ класса CNC, построенные на базе микропроцессорных наборов и относительно дешевых и компактных больших интегральных схем памяти (БИС — памяти), являются системами с жестко программируемыми алгоритмами. Это означает, что основной объем функций управления в виде программ содержится в постоянном энергонезависимом запоминающем устройстве. Он определяется при изготовлении системы и в дальнейшем не изменяется. То же самое касается функций, реализуемых в виде схем. Но при этом имеются функциональные участки системы, в которых обеспечивается возможность так называемого свободного программирования, т. е. доступ оператора к содержимому памяти системы управления и возможности его изменения в режиме диалога. Сюда относятся хранение и редактирование управляющих программ; ввод и изменение хранимых в памяти величин различных коррекций и параметров; реализация функций цикловой логики станка; формирование типовых технологических циклов обработки, что значительно упрощает составление программы управления за счет обращения к набору этих постоянных циклов.

Особо необходимо отметить большие возможности систем ЧПУ по коррекции погрешности станка (погрешности изготовления ходового винта привода подачи, отклонений от прямолинейности перемещений рабочих органов, тепловых деформаций и др.), а также диагностики состояния станка и системы ЧПУ.

По своим функциональным характеристикам современные микропроцессоры системы управления можно разделить на два типа: с вводом про-

граммы управления на перфоленте и с вводом ручную.

Второй тип систем ЧПУ получил название систем класса HNC (Hand Numerical Control). Программа управления в этих системах вводится оператором с помощью клавишей на панели управления и хранится в памяти системы. Поэтому при применении данных систем ЧПУ повышается роль и значение квалифицированного оператора, который может сам составлять и вводить программу управления.

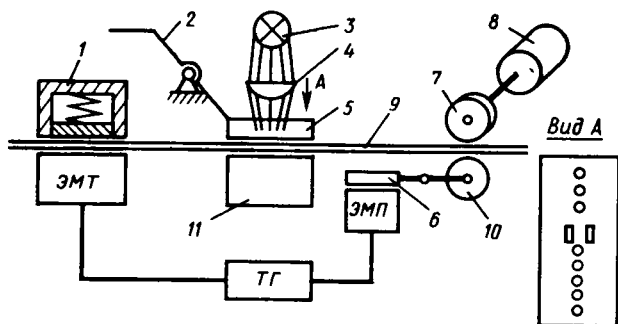
Наряду с автономными системами ЧПУ в промышленности применяют системы прямого числового программного управления группой различных станков от единой ЭВМ, получившие название систем класса DNC (Direct Numerical Control). Основными функциями этих систем являются централизованное хранение в памяти ЭВМ программ управления и их распределение по запросам от станков. При этом предусматривается также возможность редактирования программы управления. Кроме непосредственного управления группой станков системы класса DNC, часто управляют также другим вспомогательным оборудованием, обслуживающим участок станков (автоматизированными складами заготовок и инструментов, загрузчиками и др.), а также составляют и корректируют графики загрузки станков, выполняют функции диспетчера, ведут учет работы и простоев станков, число обработанных деталей и др.

§ 3. Типовая система ЧПУ и характеристика ее устройств

Укрупненная структурная схема системы ЧПУ была показана на рис. 332.

Блок ввода и считывания информации. Он предназначен для ввода и считывания с перфоленты программ управления. Считывание производится последовательно строка за строкой в пределах одного кадра при периодическом протягивании перфоленты (рис. 337) перед фотосчитывателем, содержащим фотосчитывающую головку 11 с фотопреобразователями, и осветитель, состоящий из лампы накаливания 3 и линзы 4. Восемь фотопреобразователей обеспечивают считыва-

Рис. 337. Схема устройства ввода и считывания информации с перфоленты



ние информации, а два используются для формирования синхроимпульса по отверстиям транспортной дорожки. В других устройствах применяют еще один фотопреобразователь, устанавливаемый по краю перфоленты для контроля ее обрыва.

Протягивание перфоленты 9 производится приводным роликом 7, к которому она поджимается роликом 10, при включении электромагнита протяжки (ЭМП) и притягивания якоря 6. Приводной ролик 7 вращается электродвигателем 8. При протягивании перфоленты для ее натяжения и плотного прилегания к фотосчитывающей головке 11 она подтормаживается тормозом 1 и прижимается к головке 11 прижимом 5, который при заправке перфоленты отводится рычагом 2. После считывания информации одного кадра перфолента останавливается включением тормоза ЭМТ и отключения электромагнита ЭМП. Синхронизация их работы осуществляется управляющим триггером (ТГ).

Для повышения надежности введения программы управления в системах ЧПУ она может считываться с перфоленты и вводиться в память для дальнейшего использования без перфоленты. Программа управления может также вводиться нажатием клавишей непосредственно с пульта управления оператором станка с ЧПУ.

Блок памяти. Так как информация с перфоленты считывается последовательно, а используется сразу вся в пределах одного кадра, при считывании она запоминается в блоке памяти. Здесь же производится ее контроль и формирование сигнала при обнаружении ошибки в перфоленте. Так как обработка инфор-

мации идет последовательно по кадрам, а время считывания информации одного кадра равно примерно 0,1—0,2 с, получается разрыв в передаче информации, что недопустимо. Поэтому применяют два блока памяти. Пока обрабатывается информация одного кадра из первого блока памяти, производится считывание с перфоленты второго кадра и ее запоминание во втором блоке. Время же введения информации из блока памяти в блок интерполяции ничтожно мало. Во многих системах ЧПУ блок памяти может принимать информацию, минуя блок ввода и считывания непосредственно от ЭВМ.

Блок интерполяции. Это важнейший блок в контурных системах ЧПУ. Основой этого блока является интерpolator, который по заданным программой управления числовым параметрам участка контура восстанавливает функцию $f(x, y)$.

В интервалах значений координат x и y $(x_1, y_1) - (x_2, y_2); (x_2, y_2) - (x_3, y_3)$ интерpolator вычисляет значения координат промежуточных точек этой функции (рис. 338,а).

На выходах интерполатора формируются строго синхронизированные во времени управляющие импульсы для перемещения рабочего органа станка по соответствующим осям координат.

Применяют линейные и линейно-круговые интерполаторы. В соответствии с этим первые производят линейную интерполяцию, а вторые линейную и круговую.

Линейный интерpolator обеспечивает, например, перемещение рабочего органа с фрезой диаметром d_f между двумя опорными точками по прямой

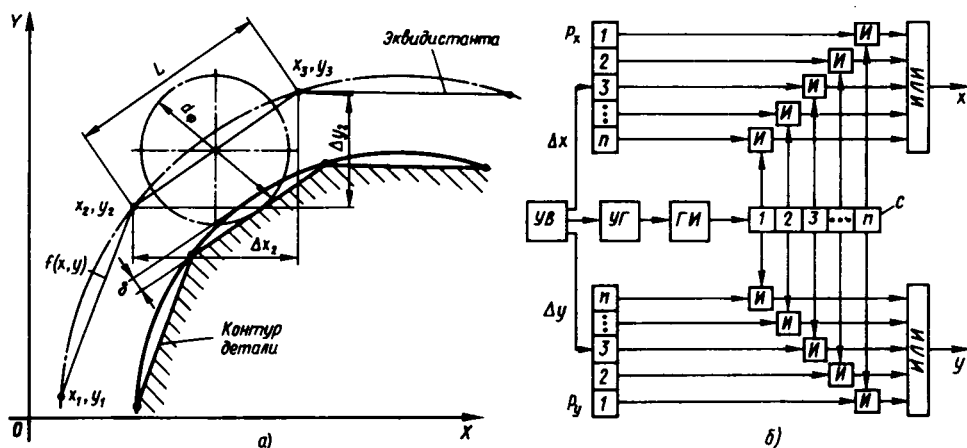


Рис. 338. Линейный интерполятор:

а — аппроксимация криволинейного профиля; б — упрощенная блок-схема линейного интерполятора; 1 — n — номера разрядов

линии с отклонением от заданного контура на величину δ (рис. 338,а). В этом случае исходной информацией для интерполятора являются величины приращений по координатам Δx_2 и Δy_2 и время отработки перемещения по прямой $L: t_{\text{отр}} = \frac{L}{s}$, где s — установленная скорость подачи инструмента. Упрощенная блок-схема линейного интерполятора для двух координат, построенная на основе двоичных умножителей, показана на рис. 338,б. С перфоленты через устройство ввода (УВ) в регистры памяти P_x и P_y , построенные по двоичному принципу, вводятся коды приращений координат Δx и Δy , а в устройство управления (УГ) генератором импульсов (ГИ) вводится информация, определяющая требуемое время отработки информации $t_{\text{отр}}$.

Во время отработки каждого кадра программы счетчик заполняется импульсами, поступающими от ГИ. В моменты совпадения кодов «1» в соответствующих разрядах двоичного счетчика C и регистрах памяти P_x и P_y , связанных между собой поразрядно схемами совпадения И, со схем сложения ИЛИ по координатам x и y будут выдаваться управляющие импульсы. Недостатком применения линейных интерполяторов является усложнение процесса программирования.

Принцип работы линейно-кругового интерполятора по методу оценочной

функции F , заключается в том, что при выработке очередного управляющего импульса логическая схема производит оценку, по какой координате следует выдавать этот импульс, чтобы суммарное перемещение рабочего органа станка максимально приближало его к заданному контуру (рис. 339).

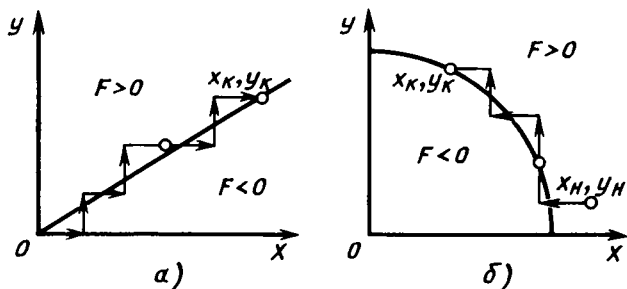
Интерполируемая прямая (см. рис. 339,а) делит плоскость, в которой она расположена, на две области: над прямой, где оценочная функция $F > 0$, и под прямой, где $F < 0$. Все точки, лежащие на теоретически заданной линии, имеют $F = 0$.

Траектория интерполяции представляет собой определенную последовательность элементарных перемещений вдоль координатных осей от начальной точки с координатами x_n, y_n до конечной точки с координатами x_k, y_k .

Если промежуточная точка траектории находится в области $F > 0$, то следующий шаг делается по оси X (см. рис. 339,а). Если же промежуточная точка находится в области $F < 0$, шаг делается по оси Y . Аналогично происходит работа интерполятора при круговой интерполяции (см. рис. 339,б).

В качестве блока интерполяции иногда используют малые ЭВМ с небольшой оперативной памятью, что позволяет значительно увеличить универсальность всего устройства ЧПУ за счет более легкой перестройки его на другой алгоритм работы.

Рис. 339. Линейно-круговая интерполяция по методу оценочной функции: а — интерполяция прямой; б — интерполяция дуги окружности



Блок управления приводами подач. С блока интерполяции информация поступает на блок управления приводами подач (см. рис. 332), который преобразует ее в форму, пригодную для управления приводами подач. Последнее производится так, чтобы при поступлении каждого импульса рабочий орган станка перемещался на определенную величину, характеризующую дискретность системы ЧПУ. При применении шаговых электродвигателей блоки управления представляют собой специальные кольцевые коммутаторы, на выходе которых включены усилители, питающие обмотки шаговых двигателей, служащие для циклического переключения обмоток ШД, что создает вращение его ротора. В замкнутых системах ЧПУ при использовании ДОС в виде вращающихся трансформаторов (ВТ) в режиме фазовращателей блоки управления представляют собой преобразователи импульсов в фазу переменного тока и фазовые дискриминаторы, которые сравнивают фазу сигнала на выходе фазового преобразователя с фазой ДОС и выдают разностный сигнал ошибки на усилитель мощности привода. В системах с импульсными ДОС блок управления представляет собой реверсивный счетчик, на один вход которого подаются импульсы от блока интерполяции, а на другой — от ДОС. На выходе счетчика включен дешифратор, преобразующий информацию счетчика в сигнал постоянного тока, являющийся сигналом ошибки, подаваемым на привод подачи.

В блоке управления приводами подач обычно расположены усилители для питания ДОС, а также устройства защиты, отключающие систему управления

при превышении допустимой ошибки слежения.

Блок скоростей подач. Этот блок обеспечивает заданную скорость подачи, а также процессы разгона и торможения в начале и в конце участков обработки по заданному закону (линейному и иногда экспоненциальному). Помимо рабочих подач (0,5—3000 мм/мин) этот блок обеспечивает, как правило, и холостой ход с повышенной скоростью (5—12 м/мин).

Пульт управления и индикации. Связь оператора с системой ЧПУ производится через пульт управления и индикации. С помощью этого пульта производится пуск и останов системы ЧПУ, переключение режима работы с автоматического на ручной и т. д., а также коррекция скорости подачи и размеров инструментов и изменения начального положения инструмента по всем или некоторым координатами. На этом пульте находятся световая сигнализация и цифровая индикация.

Блок коррекции программы. Применяется для изменения запрограммированных параметров обработки: скорости подачи и размеров инструмента (длины и диаметра).

Блок постоянных циклов. Для упрощения процесса программирования при обработке повторяющихся элементов детали (например, сверления и растачивания отверстий, нарезания резьбы и др.) применяют блок постоянных циклов. Например, на перфоленте не программируются такие движения, как быстрый подвод сверла к заготовке и быстрый вывод сверла из готового отверстия — это заложено в соответствующем постоянном цикле G81. В системах класса CNC имеется боль-

шая возможность использования как постоянных, так и обычных (непостоянных) циклов, которые кодируются и вводятся в память системы ЧПУ.

Блок технологических команд. Он обеспечивает управление циклом работы станка (его цикловой автоматикой), включающего поиск и смену режущих инструментов, переключение частоты вращения шпинделя, зажим и разжим перемещающихся рабочих органов станка, различные блокировки.

В число цикловой автоматики станка входят пускатели, электромагнитные муфты, соленоиды, концевые и путевые выключатели, реле тока, реле давления и другие контактные или бесконтактные элементы, сигнализирующие о состоянии исполнительных органов станка.

Привод подачи. Преобразование электрических сигналов в перемещения рабочих органов станка (стола, салазок, суппорта, шпиндельной бабки) осуществляется приводами подач, состоящими из приводного двигателя, переда-

точных механизмов и системы обратной связи с ДОС (в замкнутых системах ЧПУ) (рис. 340).

Привод подачи является одним из основных элементов станка с ЧПУ, определяющим его производительность, точность, надежность работы, стоимость. Основными характеристиками привода подачи являются мощность, скорость, быстродействие, точность и диапазон регулирования. Важное значение имеют также КПД, стоимость и габаритные размеры приводного двигателя.

В качестве приводных двигателей в станках с ЧПУ применяются шаговые электродвигатели (ШД), электродвигатели постоянного тока и гидроприводы (гидроцилиндр с поршнем и гидродвигатели вращения).

В связи с разработкой новых высокомоментных низкооборотных быстродействующих электродвигателей постоянного тока в приводах подач большинства станков с ЧПУ применяют электродвигатели постоянного тока.

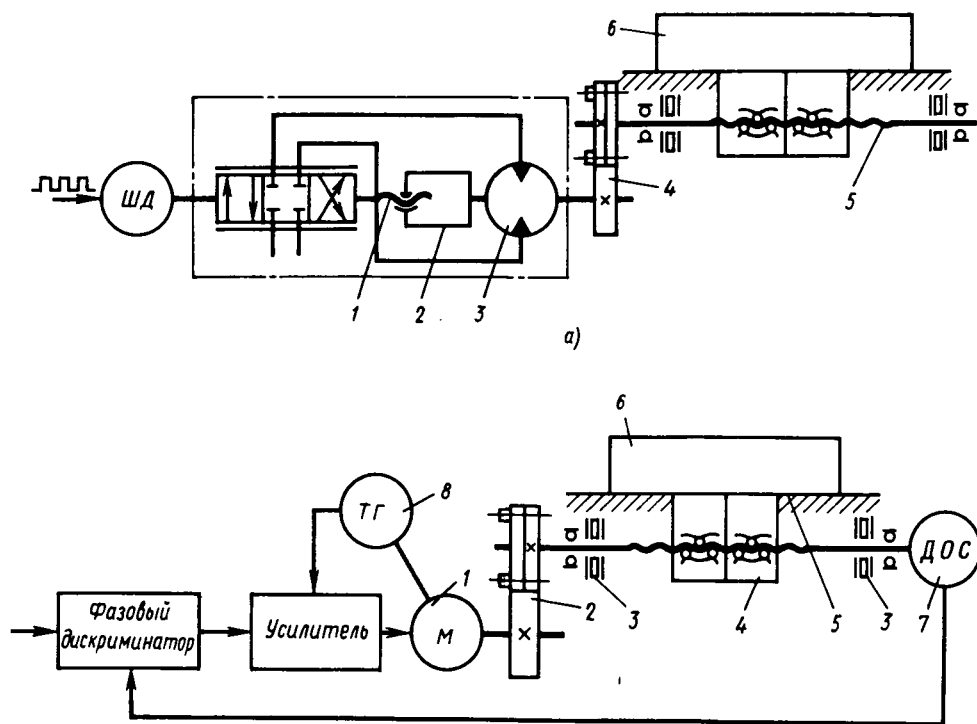


Рис. 340. Схемы приводов подач станков с ЧПУ:

а — с разомкнутой схемой управления (с ШД); б — с замкнутой схемой управления (следящей)

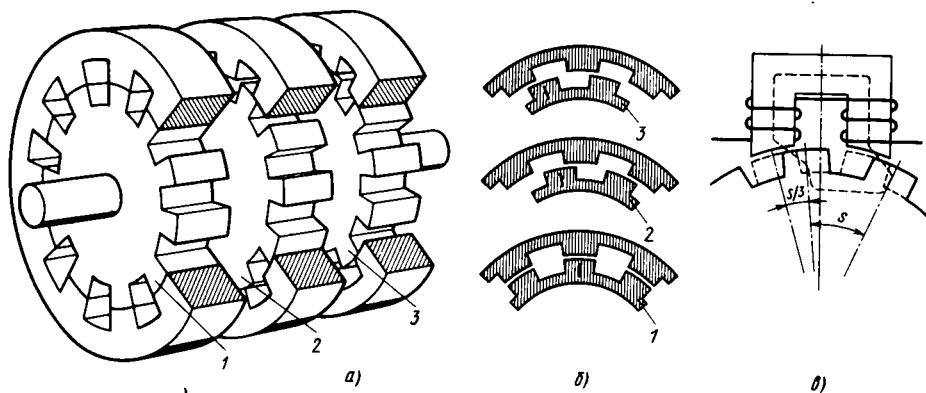


Рис. 341. Схема работы шагового электродвигателя:

а — общая схема; б — положения секций статора и ротора; в — схема прохождения магнитного потока

Шаговый привод подачи имеет разомкнутую схему управления (см. рис. 334,а) и строится на основе несилового шагового электродвигателя (ШД) и гидроусилителя (рис. 340,а) или с применением силового шагового электродвигателя. Первый тип шагового привода широко применяется в отечественных станках с ЧПУ. При применении шагового привода точность перемещения рабочих органов станка будет определяться погрешностью обработки ШД командных импульсов, а также зазорами и упругими деформациями кинематической цепи от двигателя до рабочего органа. Шаговые электродвигатели обеспечивают строго определенный угол поворота ротора при подаче управляющего напряжения на обмотки его статора (рис. 341,а). Принцип работы ШД напоминает работу поворотного электромагнита. Ротор ШД стремится повернуться так, чтобы полюсы его секций 1—3 оказались в положении наибольшей проводимости магнитного потока, образованного электрическим током, проходящим через одну из трех обмоток секций статора (рис. 341).

Секции статора имеют полюсы, аналогичные ротору. Однако они расположены таким образом, что если полюсы одной из них совпадают с полюсами ротора, у двух других они смещены соответственно на $1/3$ и на $2/3$ шага полюсов s (рис. 341,а и в).

Напряжение к обмоткам статора подается в определенной последовательно-

сти, зависящей от требуемого направления поворота ротора ШД. Частота подаваемых на ШД импульсов определяет угловую скорость вращения ротора, а их число — угол поворота. Важной характеристикой ШД является его разрешающая способность (приемистость), т. е. мгновенный перепад частот, отрабатываемый двигателем без пропуска хотя бы одного импульса. Например, для шагового электродвигателя мод. ШД5Д1 эта величина равна 2000 Гц. При плавном разгоне ШД могут работать на более высоких частотах (для мод. ШД5Д1 эта величина равна 8000 Гц).

Единичный угол поворота ротора при подаче одного управляющего импульса обычно равен $1,5^\circ \pm 0,5^\circ$, но может быть $0,5^\circ$ — 10° . Ошибка в шаге хотя и может достигать 30%, но при работе ШД она не накапливается.

Ревверсирование ШД производится изменением последовательности подачи напряжения на обмотки статора.

Схема работы ШД с гидроусилителем показана на рис. 340,а.

При повороте ротора ШД на определенный угол винтовая часть 1 распределителя вывертывается из неподвижной в этот момент гайки 2, перемещая распределитель, например, влево. При этом масло поступает в полость гидродвигателя 3, который через зубчатую передачу 4 вращает ходовой винт 5 привода рабочего органа 6. При повороте ротора гидродвигателя поворачивается гайка 2 (при неподвижной вин-

товой части распределителя) и возвращает распределитель обратно в первоначальное положение до момента перекрытия в нем щелей. Последнее произойдет при повороте ротора гидродвигателя точно на такой же угол, на который повернулся распределитель от ШД.

При повороте ротора ШД в другую сторону распределитель перемещается уже вправо и открывает каналы для прохода масла под давлением в другую полость гидродвигателя, вращая его в другую сторону.

Наиболее часто в станках с ЧПУ применяют следящие электрические приводы подачи, которые состоят из следующих элементов (рис. 340,б): исполнительного электродвигателя 1; зубчатой передачи или редуктора 2, обеспечивающих снижение частоты вращения электродвигателя и увеличение $M_{кр}$ на ходовом винте передачи 4; передачи винт — гайка 4, преобразующей вращательное движение в поступательное перемещение рабочего органа 6 станка, и системы обратной связи по скорости с тахогенератором 8 и по положению рабочего органа станка с датчиком обратной связи 7. Эффективность работы следящего электропривода в значительной степени зависит от свойств исполнительного электродвигателя, погрешностей механизмов кинематической цепи привода подачи и направляющих 5 рабочего органа, а также от датчиков обратной связи.

Исполнительные электродвигатели должны иметь высокие динамические качества, необходимые для создания больших ускорений, максимально возможную термическую перегрузочную способность, жесткие механические характеристики, обеспечивать большой диапазон регулирования частоты вращения с равномерным вращением при очень малых частотах (до 0,1 об/мин). При этом требуется также максимально использовать конструктивный объем электродвигателя, иметь высокий КПД, малый уровень вибраций и др.

В приводах подач станков с ЧПУ применяют:

1. Электродвигатели постоянного тока традиционного исполнения с улучшенными статическими и динамическими характеристиками типа серии ПБС или серии 2П, имеющие умень-

шенный момент инерции ротора, повышенную перегрузочную способность и улучшенную коммутацию.

2. Малоинерционные электродвигатели с дисковым якорем и печатной обмоткой и с гладким цилиндрическим якорем, длина которого существенно превосходит его диаметр. Якорь этих электродвигателей имеет малую массу, что уменьшает постоянную времени нагрева электродвигателя и исключает сколько-нибудь длительную работу с моментом нагрузки, превышающим номинальный. Максимальное снижение момента инерции якоря обеспечивает высокое быстродействие этих электродвигателей. Малоинерционные электродвигатели, так же как и предыдущие электродвигатели традиционного исполнения, соединяются с ходовым винтом через зубчатую передачу или редуктор.

3. Высокомоментные низкооборотные электродвигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (керамических, литых на основе сплавов типов «Альни» и «Альнико» и керамических с использованием редкоземельных материалов). Конструкция и параметры высокомоментных электродвигателей определяются в основном компоновкой магнитной системы возбуждения и типом применяемых постоянных магнитов. Керамические магниты и литые магнитные сплавы типа «Альнико» (Al—Ni—Co) имеют примерно одинаковую удельную магнитную энергию при существенном различии их основных параметров и стоимости, а керамические магниты с использованием редкоземельных материалов имеют очень большую удельную магнитную энергию, но и очень высокую стоимость исходных материалов. Поэтому электродвигатели с керамическими магнитами, как более дешевые, применяют наиболее широко. Якорь высокомоментных электродвигателей имеет традиционное исполнение, что обеспечивает его термическую инерционность и, отсюда, возможность длительной работы электродвигателя с большим перегрузочным крутящим моментом (допускают 6—10-кратную перегрузку по крутящему моменту в течение 20—30 мин).

Высокомоментные электродвигатели работают с системой тиристорного управления и обеспечивают диапазон

регулирования частоты вращения порядка нескольких тысяч. При этом высокое значение крутящего момента обеспечивается на малых частотах, когда выполняются рабочие хода, а уменьшенное значение крутящего момента — при больших частотах, когда выполняются холостые хода.

Высокомоментный электродвигатель устойчиво работает при частотах вращения до 0,1 об/мин, что позволяет его установить непосредственно на ходовом винте. Это упрощает конструкцию привода подачи, уменьшает его статические и динамические погрешности за счет исключения передаточных механизмов.

Высокомоментные электродвигатели могут представлять собой комплекс, состоящий из самого электродвигателя, встроенного тахогенератора, кругового ДОС (резольвера) и тормоза. Такая конструкция облегчает проектирование привода подачи и его монтаж на станке.

Точность работы следящего привода подачи в значительной степени зависит от погрешностей механизмов его кинематической цепи, а также от погрешностей направляющих рабочего органа (см. рис. 340,б). Это зазоры и упругие деформации в зубчатой передаче или редукторе, упругие деформации в опорах *3* ходового винта, зазоры и упругие деформации в передаче винт — гайка *4*, потери на трение в направляющих *5* и в передаче винт — гайка.

Погрешности механизмов кинематической цепи, не охваченных системой обратной связи (например, передачи винт — гайка на рис. 340,а), будут оказывать непосредственное влияние на точность перемещения рабочего органа.

Для этих механизмов большое значение имеет не только их высокая начальная точность, но и ее длительное сохранение в процессе эксплуатации.

Погрешности механизмов, которые охватываются системой обратной связи, снижают статическую и динамическую точность следящего привода, ухудшают его быстродействие. Большие потери на трение в направляющих приводят к увеличению упругих деформаций в передаточных механизмах привода подачи, а также к неравномерному перемещению рабочего органа на малых скоростях за счет так называемых релаксационных колебаний.

На рис. 342 показаны схемы гидравлических следящих приводов подачи, применяемых в станках с ЧПУ: с гидродвигателем вращения (схема *I*) и с гидроцилиндром и поршнем (схема *II*). Электрогидравлический следящий привод подачи, ранее широко применяемый в станках с ЧПУ, вытесняется следящим приводом подачи с высокомоментными электродвигателями постоянного тока [20, 36, 47].

Передаточные механизмы привода подачи. Они могут состоять из зубчатой передачи (или редуктора) и передачи винт — гайка, которая преобразует вращательное движение электродвигателя в поступательное перемещение рабочего органа станка. К этим механизмам предъявляются требования высокой точности, обусловленной отсутствием зазоров, высокой жесткостью и малыми потерями на трение.

Применение в приводах подачи высокомоментных низкооборотных быстродействующих электродвигателей постоянного тока, устанавливаемых непосредственно на ходовом винте, позво-

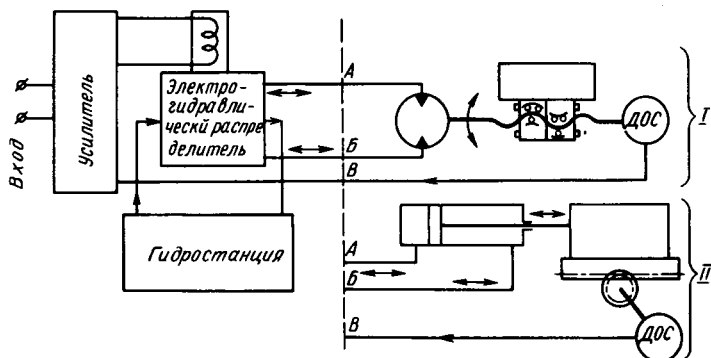


Рис. 342. Схемы гидравлических приводов подачи:

I — с гидродвигателем вращения;
II — с гидроцилиндром и поршнем

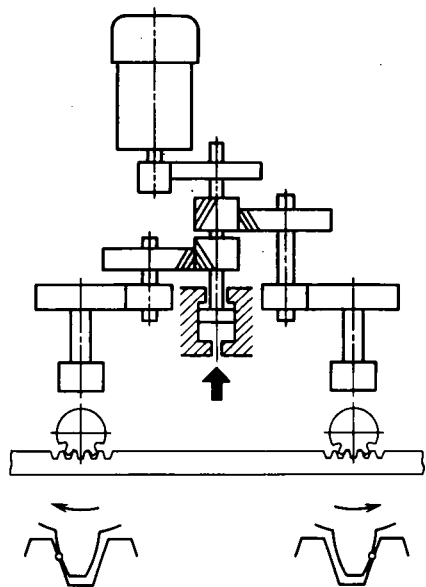


Рис. 343. Беззазорный зубчатый редуктор

ляет значительно упростить и сократить длину кинематической цепи привода подачи, увеличить ее крутильную жесткость и уменьшить число зазоров, влияющих на точность передачи движения.

Когда приводной двигатель не может быть установлен на ходовом винте, вращение на последний передается обычно через беззазорные зубчатые передачи и редуктора.

Принцип построения беззазорных редукторов заключается в том, что редуктор (передача) составляют из двух кинематических идентичных цепей, образующих замкнутый кинематический контур (рис. 343). В единичной зубчатой передаче одно зубчатое колесо делается разрезным. Устранение зазоров производится за счет взаимного разворота этих половинок с последующим жестким закреплением половинок болтами.

Устранение зазоров и создание предварительного натяга в редукторе достигаются взаимным разворотом его кинематических цепей, чаще всего за счет осевого смещения вала с косозубыми зубчатыми колесами (см. рис. 343).

Для преобразования вращательного движения приводного двигателя в поступательное перемещение рабочих органов в станках с ЧПУ применяют шариковые винтовые пары (ШВП) (см.

рис. 88). Для получения большой величины хода рабочих органов применяют беззазорные зубчато-реечные и винтореечные передачи (см. гл. 12).

Для снижения потерь на трение в направляющих станков с ЧПУ применяют обычные направляющие с антифрикционным покрытием, а также гидростатические направляющие и направляющие качения (см. гл. 11).

Датчики обратной связи. Они предназначены для преобразования линейных перемещений рабочего органа станка в электрический сигнал, содержащий информацию о величине и направлении этих перемещений.

По конструктивному исполнению ДОС могут быть круговые и линейные. Круговые ДОС обычно измеряют угол поворота ходового винта (см. рис. 334,б) или перемещение рабочего органа станка через реечную передачу (см. рис. 334,в). Преимуществом кругового ДОС является независимость его габаритных размеров от величины измеряемого перемещения, удобство установки на станке, удобство в эксплуатации. Недостатком круговых ДОС является косвенное (через угол поворота ходового винта) измерение величины перемещения рабочего органа.

Линейные ДОС осуществляют непосредственное измерение перемещения рабочего органа станка (см. рис. 334,г), что является их основным преимуществом по сравнению с круговыми ДОС. Недостатками линейных ДОС является зависимость их габаритных размеров (длины линейки) от измеряемой величины хода рабочего органа, большая сложность при установке на станке и при эксплуатации.

По принципу действия ДОС могут быть импульсными, фазовыми, кодовыми, фазоимпульсными и др.

Наиболее часто применяют датчики типа индуктосина, которые могут быть линейными и круговыми, и резольверы.

Линейный индуктосин (рис. 344) состоит из линейки 1 и ползуна 2. Длина линейки несколько превышает величину измеряемого перемещения, линейка имеет одну печатную обмотку с шагом 2 мм, с которой снимается индуцируемое напряжение $U_{\text{вых}}$. Она может быть цельной (при небольшой длине хода) или сборной из нескольких пластин (длиной по 250 мм).

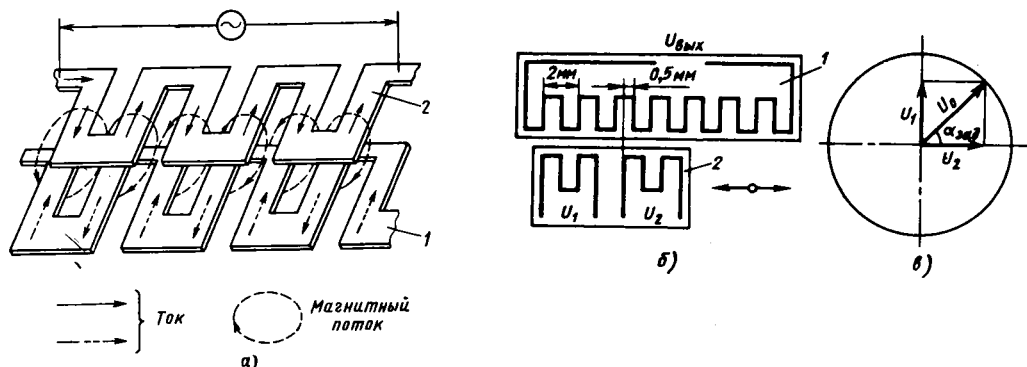


Рис. 344. Принцип работы индуктивного датчика обратной связи «Индуктосин»: а — общая схема; б — положение обмоток линейки и ползуна; в — схема напряжений

Ползун установлен на рабочем органе станка и перемещается относительно линейки. Он имеет две печатные обмотки (см. рис. 344,б), сдвинутые на $1/4$ шага (сдвиг по фазе на 90°). На каждую из обмоток подается переменный ток частотой 10 кГц, причем на первой обмотке напряжение $U_1 = U_0 \sin \alpha_{\text{зад}}$, а на второй $U_2 = U_0 \cos \alpha_{\text{зад}}$, где $\alpha_{\text{зад}}$ — заданный угол смещения (отражающий заданную величину перемещения). При перемещении ползуна 2 (рис. 344,а) на выходе обмотки линейки 1 индуцируется напряжение $U_{\text{вых}} = U_0 \sin \alpha_{\text{зад}} \cos \alpha_{\text{ф}}$ — $U_0 \cos \alpha_{\text{зад}} \sin \alpha_{\text{ф}}$, где $\alpha_{\text{ф}}$ — фактический угол смещения, отражающий фактическое перемещение рабочего органа. После преобразований получаем $U_{\text{вых}} = U_0 \sin(\alpha_{\text{зад}} - \alpha_{\text{ф}})$.

Если рабочий орган станка находится в заданном положении: $\alpha_{\text{зад}} = \alpha_{\text{ф}}$, напряжение на выходе обмотки линейки равно нулю. При отсутствии этого равенства на привод подачи поступает сигнал на дальнейшее перемещение.

Широкое применение в станках с ЧПУ находят ДОС типа вращающегося трансформатора (ВТ) (рис. 345,а). Они представляют собой маломощные двухфазные электрические машины переменного тока, у которых при вращении ротора 1 взаимная индукция между обмотками статора 2 и ротора 1 изменяется синусоидально с высокой точностью. На обмотку а статора подается напряжение $U \sin \theta$, а на обмотку б — сдвинутое по фазе на 90° напряжение

$U \cos \theta$, где θ — угол смещения, отражающий заданную величину перемещения. С обмотки ротора 1 снимается напряжение $U_{\text{вых}}$. Число обмоток в ВТ может быть различным, однако чаще всего применяют ВТ с двумя взаимно перпендикулярными обмотками на статоре и роторе. Такие синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы называют также резольверами. Помимо ВТ с одной парой полюсов применяют и многополюсные ВТ — редусины с числом пар полюсов от 15 до 180.

В позиционных системах ЧПУ применяются кодовые датчики обратной связи с измерением абсолютной величины перемещения рабочего органа.

На рис. 346 показан кодовый диск кругового фотоэлектрического датчика

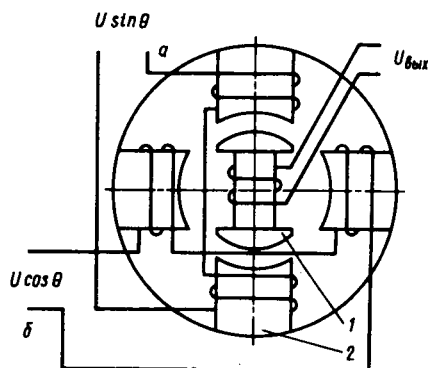


Рис. 345. Схема вращающегося трансформатора

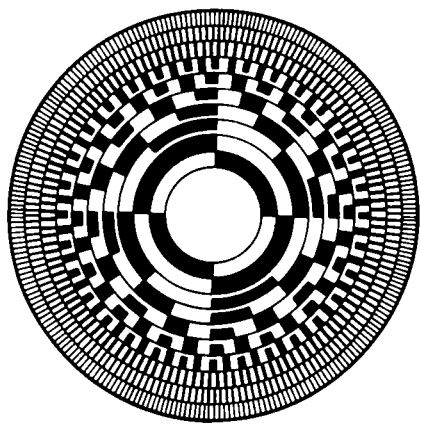


Рис. 346. Кодовый диск кругового фотоэлектрического датчика обратной связи

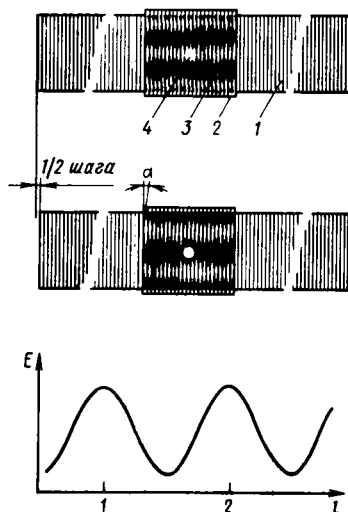


Рис. 347. Импульсный линейный ДДС фирмы «Ferranti» (Англия)

на десять двоичных разрядов. Каждое концентрическое кольцо стеклянного диска состоит из затемненных и прозрачных участков, которые не пропускают или пропускают свет на фотодиоды. Кольца соответствуют определенным размерам: наружное кольцо — первому разряду, следующее кольцо — второму разряду и т. д. Кодовый диск устанавливают на станке так, чтобы его полный оборот соответствовал перемещению рабочего органа станка на максимальную величину. При этом каждому положению рабочего органа будет соответствовать единственная кодовая комбинация на диске, выдаваемая в систему управления фотодиодами.

На рис. 347 показана схема импульсного линейного датчика фирмы «Ferranti» (Англия) с неподвижной дифракционной решеткой 1, относительно которой перемещается подвижная вспомогательная шкала 2. Она повернута относительно основной решетки на угол α , поэтому при ее перемещении на величину l образуются перемещаемые в вертикальном направлении муаровые полосы 3, которые периодически перекрывают пучок света 4, пропускаемый через решетки на два фотоземента. Освещенность E фотоземента будет изменяться по синусоидальному закону (рис. 347). При перемещении вспомо-

гательной шкалы 2 на один шаг штрихов с фотоземента поступает один импульс.

§ 4. Особенности конструкции и эксплуатации станков с ЧПУ

Полная автономность и упрощение кинематических цепей приводов подачи, когда связь между перемещениями по нескольким координатам одновременно осуществляется только через программу управления, позволяет осуществлять в станках с ЧПУ сложное во времени и точное по положению взаимодействие большого числа рабочих и вспомогательных механизмов. Возможность увеличения числа одновременно управляемых координат при применении систем ЧПУ, позволило создать принципиально новые компоновки станков с получением широких технологических возможностей при автоматическом управлении.

Станки с ЧПУ являются сложными технологическими комплексами, включающими непосредственно станок и устройство ЧПУ, построенное часто с применением мини-ЭВМ (рис. 348), которые должны быть органически взаимосвязаны с учетом их особенностей и возможностей. Надежность и качество работы станка с ЧПУ в равной степени зависят от надежности и качества ра-

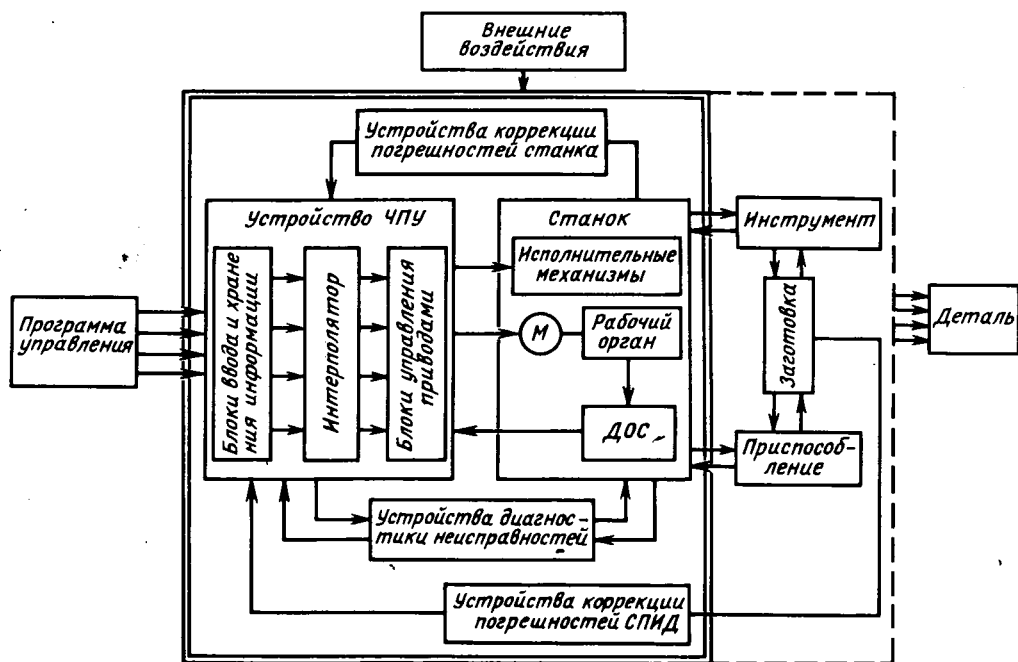


Рис. 348. Структурная схема технологической системы при применении станка с ЧПУ

боты как самого станка, так и устройства ЧПУ.

При работе станка с ЧПУ происходит взаимодействие большого числа механических, гидравлических, пневматических и электронных устройств и элементов, от правильного и надежного функционирования которых в значительной степени зависит точность выполнения заданной программы управления обработкой деталей. При этом важно не только обеспечить безотказное функционирование станка с ЧПУ с точки зрения выхода из строя его отдельных механизмов и блоков, но и обеспечить в течение установленного периода эксплуатации выполнение обусловленных его назначением технологических операций с показателями качества и производительностью, установленными нормативно-технической документацией, т. е. обеспечить заданную технологическую надежность [43].

Изменение точности станка с ЧПУ в процессе эксплуатации, происходящее под действием различных вредных процессов и внешних воздействий, обуславливается появлением допустимых и не-

допустимых повреждений как в самом станке, так и в устройстве ЧПУ (рис. 349).

Повреждения, которые приводят сразу к остановке станка с ЧПУ (из-за повреждения самого станка или устройства ЧПУ) или к недопустимым условиям его работы, являются причинами отказов его функционирования. Эти отказы являются следствием неправильных методов конструирования, изготовления станка или его эксплуатации.

Повреждения, которые не ограничивают возможности функционирования станка с ЧПУ, но приводят при его дальнейшей эксплуатации к снижению точности обработки, являются причинами его параметрических отказов (отказов по точности обработки). Параметрические отказы присущи любому сложному технологическому комплексу, каким является станок с ЧПУ.

Если более характерным для станка является параметрический отказ, то для устройства ЧПУ — отказ функционирования. Последний может проявляться в устройстве ЧПУ в виде неиндицируемых сбоев, которые не обнару-

живаются в момент их возникновения; индицируемых сбоев, которые фиксируются системой ЧПУ в момент их возникновения с прекращением дальнейшей отработки программы управления; устойчивых отказов, которые приводят сразу к остановке станка с ЧПУ. Таким образом, если индицируемые сбои и устойчивые отказы устройства ЧПУ приводят к отказам функционирования станка с ЧПУ, то его неиндицируемые сбои приводят к параметрическим отказам.

Неиндицируемые сбои в станках с разомкнутыми системами ЧПУ (см.

рис. 340, а) проявляются в виде пропуска управляющих импульсов, что может иметь место в самих электронных блоках устройства ЧПУ, при работе шагового электродвигателя и гидроусилителя, а также в передаточных механизмах привода подачи (например, из-за наличия люфта в зубчатых передачах и в передаче винт — гайка в момент реверса перемещения).

В станках с замкнутыми системами ЧПУ (см. рис. 340, б) появление неиндицируемых сбоев возможно из-за изменения параметров точности самого станка, датчика обратной связи, эле-

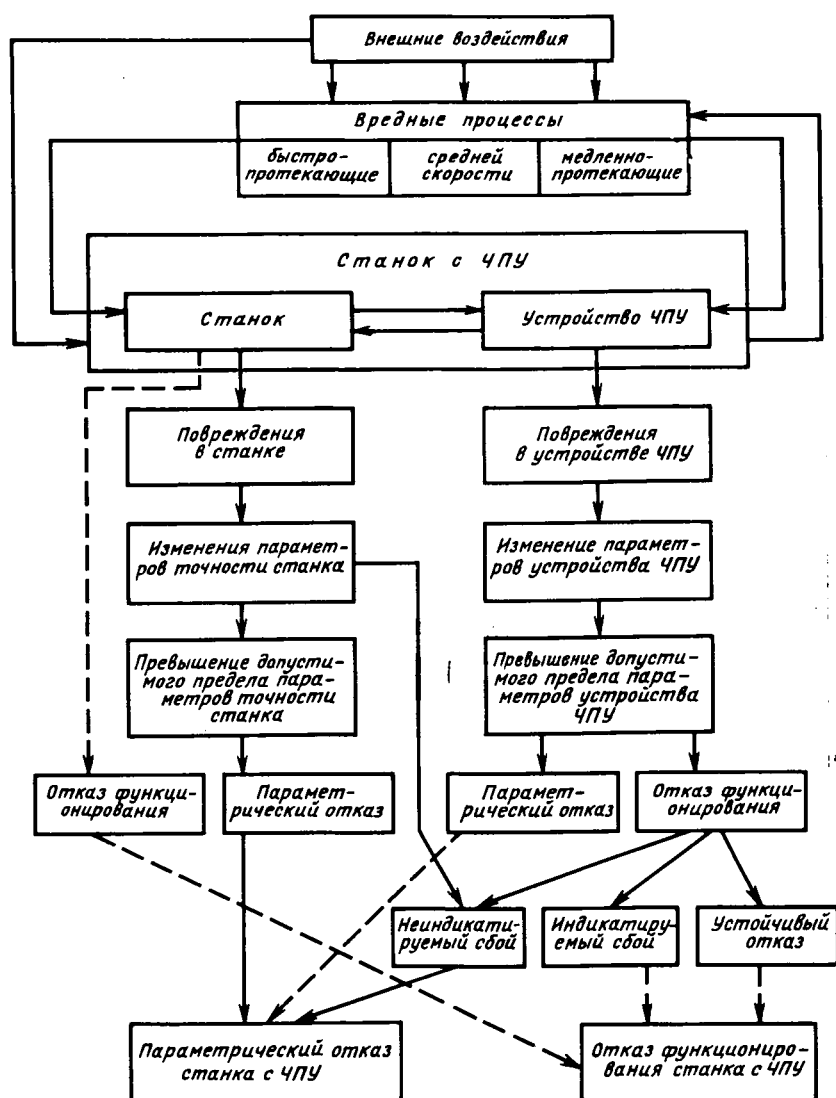


Рис. 349. Схема формирования отказов станка с ЧПУ

ментов блока ДОС в устройстве ЧПУ. Так, тепловые деформации базовых и перемещающихся элементов станка, упругие деформации, износ направляющих и другие погрешности станка могут оказывать влияние на точность измерения датчиками обратной связи действительного положения рабочих органов. В этом случае ДОС будет передавать искаженную информацию о перемещении рабочих органов, что приведет к появлению неиндицируемых сбоев и соответственно к параметрическому отказу станка с ЧПУ (см. рис. 349).

Наряду с непосредственным повышением точности станков с ЧПУ с применением новых механизмов в приводах подач (беззазорных зубчатых передач и редукторов, беззазорных шариковых винтовых пар), новых типов направляющих, снижающих потери на трение, а также повышением жесткости шпиндельного узла, опор ходового винта привода подач и других элементов станка, системы ЧПУ позволяют проводить компенсацию погрешностей как самого станка, так и погрешностей, возникающих в процессе обработки деталей. Первый метод заключается в проведении компенсации систематической составляющей погрешностей на основе априорной информации о погрешностях станка с ЧПУ или всей технологической системы (системы СПИД), полученной аналитическими расчетами или экспериментальными исследованиями (упругих деформаций, люфта в приводе подач, погрешностей инструмента, ходового винта и др.).

Компенсация может выполняться предсказанием программы управления на этапе программирования или в процессе эксплуатации редактированием программы управления, находящейся в памяти системы ЧПУ; путем программного ввода коррекций с пульта устройства ЧПУ (радиуса, длины и положения инструмента и др.).

Применение систем ЧПУ, построенных на базе мини-ЭВМ или микропроцессоров, позволяет путем использования постоянно действующих программ коррекции, заложенных в память устройства ЧПУ, проводить компенсацию накопленной погрешности шага ходового винта, зазоров в приводе подачи, тепловых деформаций. Причем

такие возможности позволяют не только повысить начальную точность станка с ЧПУ, но и путем периодического измерения меняющихся погрешностей станка и их коррекции в памяти устройства ЧПУ поддерживать точность станка в заданном пределе в процессе эксплуатации.

При другом методе компенсации погрешностей станка с ЧПУ осуществляется на основе информации, поступающей непрерывно или прерывисто от систем обратной связи с датчиками, измеряющими начальные погрешности станка (например, геометрических параметров); погрешности, возникающие в процессе эксплуатации (например, вибрации, тепловые деформации, износ инструмента и др.); погрешности, вызываемые внешними воздействиями (температура, вибрации, припуск на заготовке, твердость обрабатываемого материала и др.); погрешности непосредственно обрабатываемых деталей (размеров, формы, шероховатости и др.).

Применение обратных связей усложняет станок с ЧПУ, но позволяет компенсировать не только систематическую, но и случайную составляющую погрешностей и проводить эту компенсацию непрерывно в процессе эксплуатации. По такому методу работают самоприспосабливающиеся (адаптивные) системы управления, которые позволяют компенсировать погрешности обработки, обусловленные такими случайными факторами, как колебания припуска на заготовке и твердости обрабатываемого материала, а также затупление режущего инструмента.

Необходимость рассмотрения станка с ЧПУ как единого технологического комплекса меняет не только задачи его конструирования, но также методы его контроля и приемки, методы эксплуатации, профилактики и ремонта.

Так, для станков с ЧПУ разработаны и применяются новые виды контроля их начальной точности. При работе станка с ЧПУ вхолостую определяется комплексный показатель начальной точности — погрешность позиционирования $\Delta_{\text{поз}}$. Величину $\Delta_{\text{поз}}$ определяют методом статистической оценки (рис. 350):

$$\Delta_{\text{поз}} = (\bar{x} - x_{\text{пор}}) \pm \left(3\sigma + \frac{f}{2} \right).$$

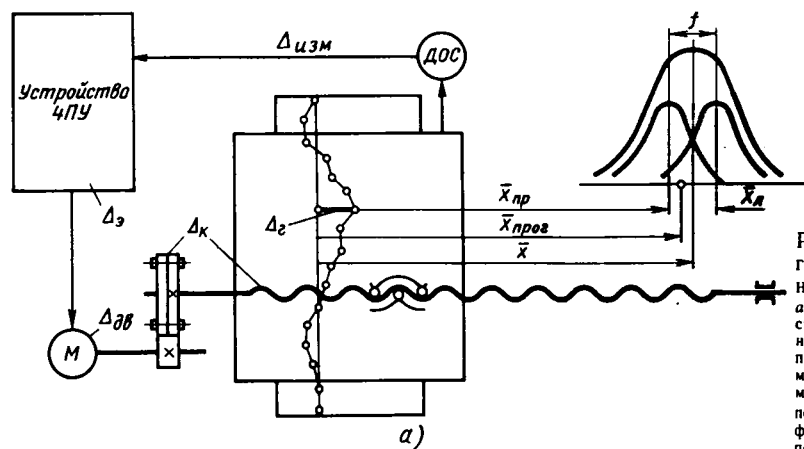
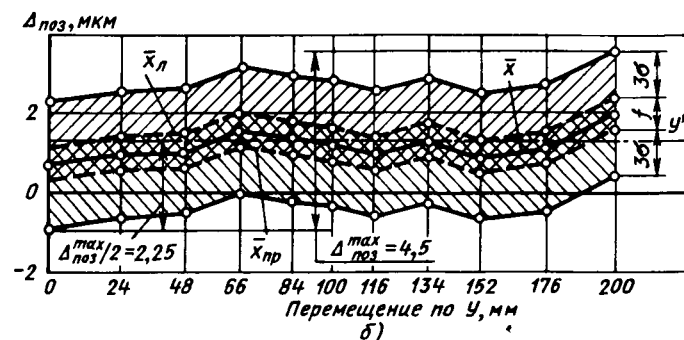


Рис. 350. Определение погрешности позиционирования:

а — схема формирования погрешности позиционирования: $\Delta_{\text{э}}$ — погрешность электронных блоков; $\Delta_{\text{дв}}$ — погрешность двигателя; $\Delta_{\text{к}}$ — кинематическая погрешность; $\Delta_{\text{г}}$ — геометрическая погрешность; $\Delta_{\text{изм}}$ — погрешность обратной связи; б — график погрешности при двустороннем позиционировании стола станка с ЧПУ



где $\bar{x} = \frac{\bar{x}_{\text{пр}} + \bar{x}_{\text{л}}}{2}$ — среднее арифметическое значение действительного положения рабочего органа при многократном двустороннем подходе; $\bar{x}_{\text{пр}}$ ($\bar{x}_{\text{л}}$) — среднее арифметическое значение действительного положения рабочего органа при многократном одностороннем правом (левом) подходе; $x_{\text{прог}}$ — заданное по программе управления положение рабочего органа; 3σ — величина зоны рассеивания, характеризующая случайные процессы при многократном двустороннем позиционировании; f — зона нечувствительности («мертвый ход»), имеющая место при реверсе перемещения рабочего органа.

Комплексная проверка станка с ЧПУ в работе проводится путем обработки заданной детали (или нескольких различных деталей) на определенных режимах резания с регламентацией получаемых размеров. Применяют также контроль точности станков с ЧПУ осу-

пыванием специального эталона по заданной программе и фиксации получаемых отклонений. Контроль надежности работы станка и устройства ЧПУ проводится при их непрерывной работе вхолостую по определенной тест-программе в течение заданного времени.

Применение станков с ЧПУ потребовало, учитывая их специфику, разработать рациональную систему их технического обслуживания, профилактики и ремонта. Большая сложность станков с ЧПУ и случайный характер их отказов в процессе эксплуатации создают большие трудности в поиске возникающих неисправностей, а также в определении причин изменения точности обработки. Это приводит к длительным простоям дорогостоящего оборудования, каким являются станки с ЧПУ. Современные системы ЧПУ позволяют проводить диагностику технического состояния станка и устройства ЧПУ, обеспечивают опе-

ративную выдачу информации о возникающих неисправностях, а также позволяют прогнозировать состояние как отдельных механизмов и блоков, так

и станка с ЧПУ в целом с выдачей информации для проведения необходимых мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту.

Глава 40 Самоприспособляющиеся (адаптивные) системы управления

§ 1. Основные принципы построения самоприспособляющихся систем управления

Разработка и применение самоприспособляющихся систем управления (СПСУ) являются следующим логическим шагом в автоматизации процессов обработки после разработки систем ЧПУ, на базе которых они в основном строятся.

Перспективность развития и внедрение СПСУ в металлообработке обуславливается следующими основными факторами: а) необходимость автоматизации мелкосерийного производства, особенностью которого является большая номенклатура обрабатываемых деталей и, как следствие этого, весьма широкий диапазон изменения обрабатываемых материалов, режимов резания, припусков на обработку, твердости материала заготовок и др.; б) необходимость обработки заготовок из новых труднообрабатываемых материалов, по которым нет проверенных данных по режимам резания; в) необходимость повышения точности обработки деталей с компенсацией влияния на нее случайных факторов (колебание припуска, твердости и др.); г) необходимость ограничения режимов обработки, заданных программой управления, при превышении возможностей станка по его точностным показателям; д) необходимость выполнения сложных видов обработки с обеспечением требуемого качества обработки и экономичным расходом режущего инструмента (например, сверление отверстий диаметром до 3 мм в деталях из жаропрочной стали); е) упрощение процесса программирования; ж) необходимость объединения процесса проектирования и обработки

в одно целое с оптимизацией их выполнения и др.

Производительность и себестоимость обработки становятся зависимыми от эффективности самого процесса резания, так как затраты ручного труда и вспомогательного времени сильно уменьшаются, а доля машинного времени резко возрастает из-за увеличивающегося использования труднообрабатываемых материалов, усложнения деталей и повышения требований к точности их обработки.

При обработке деталей на станках с обычными системами автоматического управления, в том числе и с системами ЧПУ, уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания процесса обработки и насколько остаются неизменными исходные параметры, принятые при расчете и составлении программы управления (величина припуска, твердость обрабатываемого материала, жесткость технологической системы и др.). В действительности параметры процесса обработки не остаются постоянными. Поэтому традиционные методы назначения режимов резания основаны на приближенном представлении о процессе резания и ожидаемых значениях его параметров. Используемые при этом методика и нормативные материалы не учитывают полностью всего многообразия технологических способов получения заготовок, а также состояния технологической системы.

Наличие разброса исходных параметров процесса обработки вынуждает назначать режимы резания, как правило, несколько заниженными для снижения вероятности появления брака обработки, снижения износа режущего

го инструмента и его повышенного расхода, а также предохранения от аварийных ситуаций. С другой стороны, выполнение процесса обработки с постоянными режимами резания при указанном выше разбросе исходных параметров процесса обработки приводит к значительным колебаниям силы резания. Это наряду с изменением жесткости технологической системы приводит к значительным колебаниям упругих перемещений последней, и как следствие, к погрешностям обработки деталей.

Случайный характер изменения припуска и твердости материала заготовки изменяет скорость износа режущего инструмента и приводит к отклонению его фактической стойкости от заданной.

Указанные выше факторы приводят к снижению производительности, разбросу показателей качества обработки, недоиспользованию резервов снижения себестоимости обработки деталей.

Самоприспосабливающиеся системы управления обеспечивают автоматическое приспособление режимов обработки деталей по определенному критерию к изменяющимся условиям обработки, осуществляемое на основе информации, получаемой непосредственно в процессе обработки детали. Самоприспосабливающиеся системы управления являются замкнутыми системами, работающими на основе неполной начальной информации (см. гл. 36, § 3). В этих системах управления, кроме обратной связи по положению рабочих органов станка (если они построены на основе ЧПУ) имеется ряд обратных связей, учитывающих качественное и количественное изменение параметров процесса обработки и состояние элементов технологической системы из-за колебания припуска, твердости заготовок и других факторов, которые являются случайными и не могут быть учтены заранее при составлении программы управления (см. рис. 308, в).

На основе получаемой информации о текущем состоянии процесса обработки СПСУ, увеличивая или уменьшая съем металла с заготовки путем соответствующего изменения скорости резания и подачи, поддерживает постоянным какой-либо заданный пара-

метр процесса обработки (например, силу резания) или обеспечивает получение оптимальных значений таких критериев, как точность обработки, производительность или себестоимость обработки.

Основой для построения СПСУ является математическая модель управляемого процесса обработки, представляющая совокупность критерия оптимальности и технических ограничений. Технические ограничения задаются с учетом состояния и конструкции станка, форм и точности детали, конструкции режущего инструмента и других исходных данных. К основным техническим ограничениям относятся прочность и жесткость режущего инструмента и устройств станка, мощность привода главного движения, сила зажима детали, тепловые деформации детали и инструмента и др.

Для построения математической модели процесса обработки необходимо аналитически задать систему технических ограничений области поиска оптимальных режимов резания и выразить зависимость критерия оптимальности от элементов режимов резания. Измеряемыми параметрами, характеризующими процесс обработки, могут быть сила резания, вибрации, температура в зоне резания, $M_{кр}$ на шпинделе, мощность приводного двигателя и др.

Наиболее информативным показателем процесса резания является изменение силы резания, которое обусловлено совместным влиянием изменения припуска на обработку, колебания твердости обрабатываемого материала, затупления режущего инструмента и др.

Применение СПСУ позволяет решить такие задачи, как повышение производительности обработки на черновых операциях, точности обработки деталей по размеру и форме и ее стабильности, повышение качества обработанной поверхности, повышение стойкости режущего инструмента, снижение себестоимости обработки, защиту станка от повреждений и режущего инструмента от поломок и др.

Испытания СПСУ в лабораторных и производственных условиях показали их высокую эффективность. Применение данных систем позволяет по-

высить производительность обработки до 50%, точность формы в 5—6 раз, стабильность процесса по точности в 2 раза, стойкость режущего инструмента в 2—3 раза, сократить в 3—4 раза расход режущего инструмента.

Самоприспосабливающимися системами управления могут быть оснащены практически все типы металло-режущего оборудования. Наибольшее применение эти системы нашли на токарных, фрезерных станках и станках для глубокого сверления.

Широкому внедрению СПСУ пока еще препятствуют недостаточные знания математических зависимостей для описания управляемого процесса резания и отсутствие надежных измерительных средств (датчиков).

§ 2. Классификация самоприспосаблиющихся систем управления, их характеристика

В зависимости от принципа работы СПСУ делят на две группы: а) самоприспосаблиющиеся системы предельного управления; б) самоприспосаблиющиеся системы оптимального управления.

Самоприспосаблиющиеся системы предельного управления обеспечивают постоянное значение заданных параметров процесса резания при действии различных возмущений f (рис. 351).

В процессе обработки детали по заданной программе управления (ПУ) эта система управления определяет один или несколько параметров, характеризующих процесс резания, которые сравниваются в регуляторе с заданными граничными или пре-

дельными значениями (ПЗ). При наличии рассогласования в значениях этих величин оно устраняется системой управления изменением величины подачи s и скорости резания v на величины соответственно Δs и Δv . Наибольшее применение получают более простые системы управления, в которых регулируемой величиной является только подача s .

Самоприспосаблиющиеся системы предельного управления позволяют использовать полную мощность станка. Осуществляя контроль за потребляемой станком мощностью, система управления автоматически снижает подачу, как только расход мощности достигнет допустимого максимального значения. При наличии измерительного устройства, непрерывно следящего за величиной упругого отжатия режущей кромки, система автоматически стабилизирует это отжатие при колебании припуска и твердости заготовки регулированием величины подачи s при обработке детали на длине l (рис. 352). Эти системы позволяют осуществлять холостые проходы, а также подвод и отвод режущего инструмента на ускоренном ходу (см. рис. 352), проводить автоматическое распределение снимаемого с заготовки припуска (на станках с ЧПУ упрощается процесс программирования), осуществлять контроль стойкости инструмента и при недопустимо большом его износе подавать сигнал о необходимости смены инструмента. Предельные значения параметров, которые задаются самоприспосаблиющейся системе предельного управления, определяются на основе предварительного исследования процесса обработки.

Самоприспосаблиющиеся системы оптимального управления (рис. 353) при обработке детали по заданной программе управления (ПУ) производят автоматическое определение сочетания скорости v и подачи s для обеспечения экстремального значения целевой функции H процесса обработки (точности обработки, производительности или себестоимости обработки) при наличии технических ограничений (ТО) и действия возмущающих воздействий f (колебаний припуска, твердости материала заготовки, режущих свойств инструмента и др.).

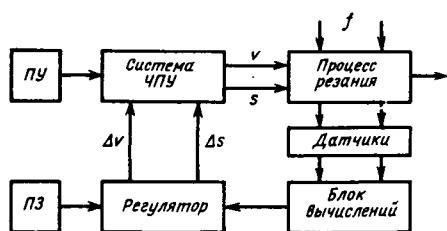


Рис. 351. Структурная схема самоприспосаблиющейся системы предельного управления

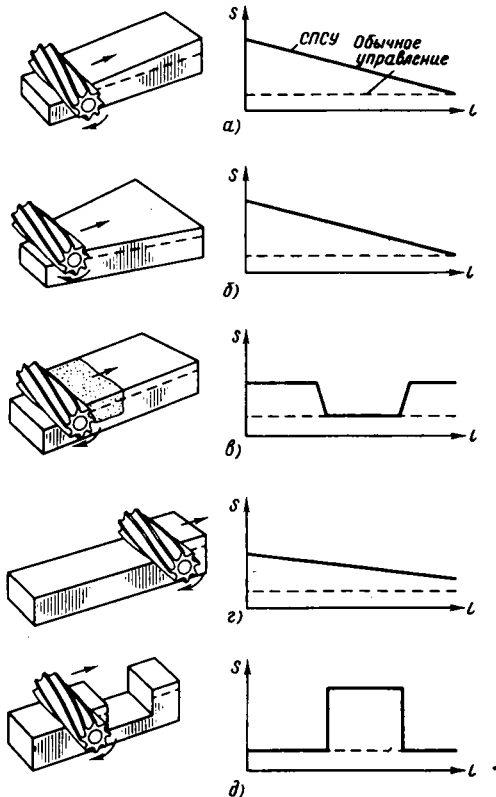


Рис. 352. Примеры обработки деталей и графики изменения подачи s в зависимости от длины обработки l :

a — с переменной глубиной резания; b — с переменной шириной; c — с переменной твердостью заготовки; d — обработка с учетом износа инструмента; e — обработка детали с необрабатываемым участком

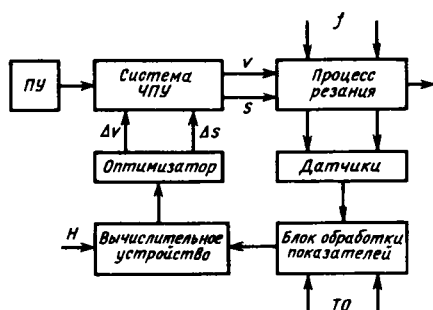


Рис. 353. Структурная схема самоприспосабливающейся системы оптимального управления

Оптимизатор системы (см. рис. 353) варьирует регулируемыми параметрами процесса обработки v и s путем введения поправок Δv и Δs до тех пор, пока значение целевой функции не попадает в оптимальную зону. Возмущения f , которые будут постоянно смещать оптимальную зону, также компенсируются системой управления. В результате самоприспосаблиющиеся системы оптимального управления являются более универсальными, но одновременно и более сложными и дорогими.

На рис. 354 показана структурная схема самоприспосабливающейся системы оптимального управления фирмы «Bendix» (США). В основу работы системы управления положен критерий производительности

$$H = \frac{\mu}{a + \frac{a\tau + b}{W_0} v},$$

где μ — скорость съема металла; a — норма накладных расходов; τ — время смены инструмента; b — величина амортизации инструмента; v — скорость износа инструмента; W_0 — максимально допустимый износ.

Система управления на основе измеряемых параметров ($M_{кр}$, температуры в зоне резания t° и вибраций), поступающих в блок измерений БИ и далее в блок обработки показателей БОП, используя заданную математическую модель и алгоритм поиска и варьируя значениями v и s , определяет оптимальное значение показателя производительности H . Вычислительное устройство ВУ и оптимизатор, получая значения скорости износа инструмента (1), скорости съема металла (2), технических ограничений (ТО) (сигнал 3) и параметров процесса резания (4) вырабатывают при $H_{опт}$ корректирующие сигналы Δv и Δs , подаваемые через согласующее устройство СУ в систему управления.

Функция критерия производительности H может быть представлена как функция v и s и изображена в виде трехмерной поверхности, имеющей вид контурного холма (рис. 355) с разными уровнями значений H , вершина которого определяет оптимальное значение H ,

Рис. 354. Структурная схема самоприспосабливающейся системы оптимального управления фирмы «Bendix» (США)

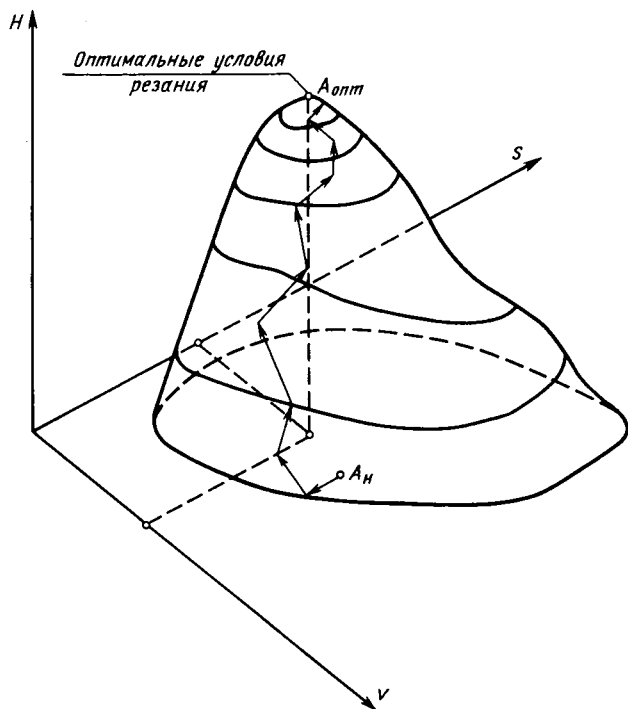
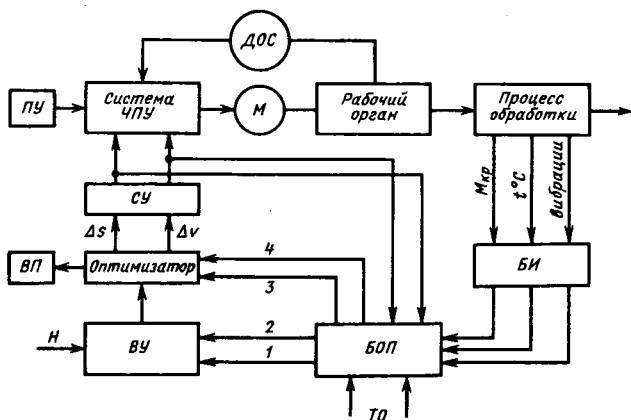


Рис. 355. Схема поиска оптимального значения критерия производительности

а также оптимальные условия резания (точка $A_{\text{опт}}$).

Поскольку оптимальное значение H заранее неизвестно, то в начале процесса обработки начальное значение H (точка A_H на рис. 355) может находиться в любом месте поверхности.

Далее система управления, построенная на основе соответствующего метода поиска экстремума (например, метод градиента, метод проб и ошибок), изменяет параметры процесса резания v и s в направлении повышения величины H до его оптимального значения в точке $A_{\text{опт}}$.

§ 3. Сравнительный анализ систем автоматического управления и перспективы их развития

Выбор или разработка необходимой системы автоматического управления из числа рассмотренных выше производится на основе их сравнительного анализа по основным критериям, указанным в гл. 36, § 3. Анализ изученных САУ по указанным критериям показывает, что ни одна из них не отвечает этим критериям полностью. Поэтому выбор нужной САУ произво-

дится исходя из требований конкретного производства.

Системы управления с РВ просты по конструкции, имеют невысокую стоимость, надежны, обеспечивают управление сложным циклом обработки с участием многих инструментов, обеспечивают достаточно высокую точность. С другой стороны, их переналадка очень сложна, связана с трудоемким изготовлением кулачков и оснастки и проведением их наладки на автомате. Поэтому эти системы управления рекомендуется применять в основном в массовом и крупносерийном производствах для обработки и сборки достаточно сложных деталей.

Развитие систем управления с РВ идет по пути расширения их функций управления для обеспечения больших технологических возможностей станков и упрощения их переналадки для повышения мобильности. Распределительный вал с кулачками делают быстросменным, создают комбинированные системы управления с упрощением переналадки (см. рис. 318), переналадку проводят только изменением передаточных отношений рычагов кулачковых механизмов при постоянных кулачках (многошпиндельные токарные автоматы и др.).

Системы циклового программного управления имеют достаточно высокую мобильность, просты и надежны в эксплуатации, стоимость их невысока. Точность обработки на станках с этими системами управления средняя и зависит от точности расстановки упоров и их смещения или износа в процессе эксплуатации, а технологические возможности ограничены осуществлением только прямолинейных циклов перемещений. Из-за того, что время цикла обработки здесь может колебаться, имеем ограниченные возможности по совмещению рабочих и холостых ходов.

Системы ЦПУ применяются в основном в серийном, а иногда и в крупносерийном и массовом производствах, где системы ЦПУ используются как унифицированные системы управления при создании специализированного оборудования. Создан и применяется в промышленности новый вид мобильно-го металлорежущего оборудования с системами ЦПУ — многоцелевые стан-

ки с автоматической сменой многошпиндельных головок и построенные на их основе технологические комплексы. Происходит дальнейшее совершенствование самих систем ЦПУ, которые строят на основе интегральных микросхем малой, средней и большой степени интеграции.

Следящие копировальные системы имеют достаточно высокую мобильность, обеспечивают управление обработкой сложных плоских и объемных деталей, но управляют работой только одного инструмента. Эти системы управления средней сложности и стоимости надежны в работе. При применении копировальных систем трудоемким процессом является изготовление копиров, особенно объемных. Эту проблему пытаются в некоторых случаях упростить применением фотокопировальных систем управления. Следящие копировальные системы управления применяют в серийном и мелкосерийном производствах. До появления систем ЧПУ они были основным средством автоматизации мелкосерийного производства.

Системы ЧПУ являются высокоомобильными системами, обеспечивающими управление обработкой сложных деталей с высокой точностью. С их помощью можно управлять сложным циклом обработки с использованием большого числа инструментов, установленных в поворотной головке или в магазине, а также с применением многошпиндельных инструментальных головок.

Применение новых систем ЧПУ, построенных на основе мини-ЭВМ, микропроцессорных наборов и больших интегральных схем памяти, позволяет резко расширить функциональные возможности числового программного управления с появлением новых ранее неимевшихся функций: хранения в памяти программы управления и ее редактирования непосредственно на рабочем месте, диалоговое общение с оператором, возможность введения программы управления оператором вручную с пульта управления, проведение диагностики неисправностей, компенсация систематических погрешностей станка и др.

Применение самоприспосаблиющихся (адаптивных) систем управления

позволяет повысить точность и производительность обработки, снизить ее себестоимость.

Все шире при создании систем ЧПУ используют принцип унификации и агрегатирования, что позволяет легко создавать широкую номенклатуру этих систем, снизить их стоимость, быстрее устранять неисправности. Широкое развитие получает групповое управление станками от ЭВМ.

Недостатком систем ЧПУ по сравнению с другими САУ является их большая сложность и высокая стоимость. Подготовка программ управления должна проводиться квалифицированными специалистами, как правило, с использованием ЭВМ.

Системы ЧПУ являются основным средством автоматизации мелкосерийного и особенно серийного производства.

Большое влияние системы ЧПУ оказывают на дальнейшее развитие компоновки и конструкции станков с ЧПУ, повышение степени их автоматизации, расширение технологических возможностей, повышения точности и надежности их работы, что достигается за счет:

а) применения принципа агрегатирования при создании станков с ЧПУ (особенно многооперационных), разработки унифицированных инструментальных систем (режущий и вспомогательный инструмент, приборы для предварительной настройки инструментов) и приспособлений для различных типов станков с ЧПУ;

б) применения в качестве привода главного движения электродвигателей постоянного тока с тиристорным управлением, что позволяет расширить диапазон частот вращения шпинделя (особенно верхнего предела — более 4000 об/мин), и получить возмож-

ность бесступенчатого регулирования, упростить коробку скоростей, выбирать в каждом конкретном случае оптимальные режимы резания;

в) применения в приводах подач высокомоментных быстродействующих электродвигателей постоянного тока со встроенным тормозом и датчиком обратной связи, что позволяет устанавливать электродвигатель непосредственно на ходовом винте с получением широкого диапазона бесступенчато регулируемых рабочих подач (0,5 — 3000 мм/мин и выше) при увеличении скорости холостых ходов до 10—12 м/мин и минимальном времени разгона и торможения;

г) повышения жесткости и виброустойчивости, снижения потерь на трение и тепловых деформаций, повышения точности линейных перемещений за счет более рациональной компоновки и конструкции элементов станка, применения новых механизмов (безазорных зубчатых передач, шариковых винтовых пар; направляющих качения и др.), возможности компенсации погрешностей станка системой ЧПУ; применения более точных систем обратной связи с дискретностью до 0,001 мм и меньше;

д) совершенствования существующих и разработки новых методов проверки точностных характеристик станков с ЧПУ (как отдельно самих станков, так и в комплексе с системой ЧПУ), построения более рациональной структуры технического обслуживания и профилактики на основе применения систем диагностики состояния станка и системы управления (облегчается поиск причин неисправностей и сокращается время простоев этого дорогостоящего оборудования), совершенствования приемов и методов ремонта.

**41 Проблемы и пути автоматизации
производственных процессов****§ 1. Основные критерии
оценки техники**

Автоматизация производственных процессов — это совокупность мероприятий по созданию автоматически действующих средств производства. При этом предусматривается использование высокопроизводительных машин на базе прогрессивной технологии, автоматическое управление и контроль за работой машин и технологическими процессами. Автоматизация производственных процессов является основным средством технического прогресса.

Для оценки техники используют большое число показателей, каждый из которых может характеризовать отдельные стороны технологических процессов и средств труда. При автоматизации производственных процессов важнейшими из этих показателей являются производительность оборудования, количество обслуживающего персонала, стоимость техники и затраты на ее эксплуатацию, качество выпускаемой продукции. Отдельно каждый из показателей не может служить объективной характеристикой техники в целом. Так, высокая производительность оборудования может быть связана с резким увеличением стоимости эксплуатации и снижением качества, многостаночное обслуживание — с увеличением затрат на автоматизацию и т. д.

Автоматизация производственных процессов в социалистических условиях позволяет решать проблемы повышения производительности средств производства, улучшения качества, комплексной стандартизации, сокращения числа обслуживающего персонала,

улучшения условий труда и др. Но это не означает, что любой вариант автоматизации — шаг вперед в развитии производства, что он является экономически выгодным и целесообразным на данном этапе.

Критерием прогрессивности новой техники является рост производительности общественного труда. Классики марксизма-ленинизма указывают, что каждый новый общественный строй побеждает прежде всего потому, что он обеспечивает более высокий уровень производительности труда. «Производительность труда, это, в последнем счете, самое важное, самое главное для победы нового общественного строя... Капитализм может быть окончательно побежден и будет побежден тем, что социализм создает новую, гораздо более высокую производительность труда». (В. И. Ленин, соч. изд. 4-е, т. 29, с. 394).

Партия и правительство сосредотачивают особое внимание на ускорении роста производительности труда, что является решающим условием дальнейшего развития производства и подъема благосостояния народа. Так, в десятилетней пятилетке примерно 90% прироста промышленной продукции обеспечено за счет повышения производительности труда. Большие задачи решаются по автоматизации металлорежущего оборудования, созданию комплексных автоматических линий с крупносерийным и массовым выпуском изделий.

Выбор основного направления автоматизации, прогрессивной техники необходимо осуществлять на основе всестороннего анализа производительности труда, с выявлением зависимости

производительности труда от конкретных технико-экономических характеристик машин (производительности и надежности в работе, стоимости, сроков проектирования и внедрения и др.).

Теория производительности [55], примененная к анализу производительности труда, позволяет осуществить оценку прогрессивности новой техники и обосновать выбор вариантов автоматизации.

Производительность труда определяется количеством выпущенной продукции, отнесенным к трудовым затратам:

$$П = \frac{W}{T}, \quad (242)$$

где W — количество выпущенной продукции за некоторый промежуток времени; T — суммарные трудовые затраты, необходимые для выпуска данного количества продукции.

Количество выпущенной продукции измеряют в штуках, единицах веса, длины, объема и т. д. Трудовые затраты можно выразить числом занятых людей, затраченным временем, в человеко-часах или в денежной форме.

Количество выпущенной продукции за некоторый промежуток времени

$$W = \sum_{i=1}^N Q_{ri}, \quad (243)$$

где Q_{ri} — выпуск продукции за i -й год; N — время эксплуатации, г.

При постоянном годовом выпуске Q_r

$$W = Q_r N. \quad (244)$$

Суммарные трудовые затраты складываются из единовременных затрат прошлого труда на создание или приобретение оборудования, строительство помещений, зданий и т. д., а также из затрат, возникающих в процессе эксплуатации техники и возрастающих в течение срока службы (зарплата обслуживающего персонала, затраты на электроэнергию, инструмент, вспомогательные материалы и др.). Таким образом:

$$T = T_n + N(T_v + T_{ж}), \quad (245)$$

где T_n — единовременные затраты прошлого труда на оборудование, помещения, здания и т. д.; T_v — годовые

текущие затраты прошлого труда на материалы, инструмент, электроэнергию, ремонт и т. д.; $T_{ж}$ — годовые текущие затраты живого труда при обслуживании машин.

После подстановки формул (244) и (245) в формулу (242) получим

$$П = \frac{Q_r N}{T_n + N(T_v + T_{ж})}. \quad (246)$$

Формула (246) показывает, что производительность труда зависит от многих факторов, а график изменения производительности имеет гиперболический характер. Таким образом, одна и та же техника обеспечивает различную производительность труда в зависимости от сроков службы. При $N \rightarrow \infty$ пределом роста производительности будет значение

числа $\frac{Q_r}{T_v + T_{ж}}$. На рис. 356 показано изменение выпуска продукции, трудовых затрат и производительности труда во времени.

В период пуска и освоения новая техника, как правило, не обеспечивает высокой производительности труда, что в значительной мере зависит от единовременных затрат на оборудование и сооружения. В дальнейшем производительность труда непрерывно растет в зависимости от выпуска продукции и текущих затрат. При изменении соотношения между количеством выпускаемой продукции и текущими затратами возможно увеличение или снижение предела роста производительности труда его для одного и того же варианта техники.

За год эксплуатации выпуск продукции составит Q_r , а общие затраты T_n увеличатся на $T_v + T_{ж}$. Производительность труда возрастает с нулевого значения (при $N=0$) до $П_1$. Штриховой линией показан запланированный рост производительности труда $П_{пл}$ для данного производства. График дает возможность определить сроки рационального использования техники, время N_1 достижения плановых показателей и моральные сроки N_2 старения, когда необходима замена существующей техники более производительной.

В реальных производственных условиях производительность машин и текущие затраты на их обслуживание изменяются во времени, так происходит

$W; T; \Pi$

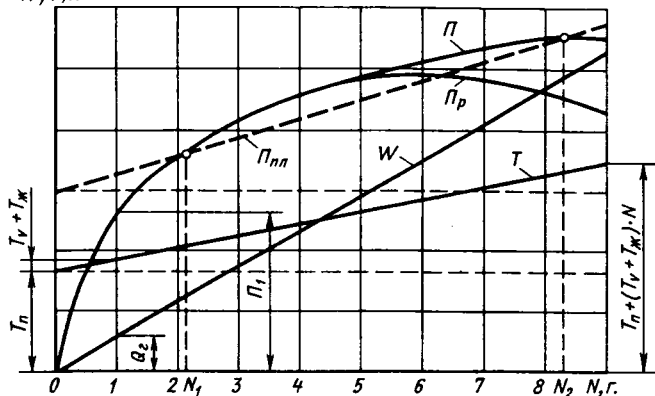


Рис. 356. Изменение выпуска продукции W , трудовых затрат T и производительности труда Π во времени

некоторое уменьшение производительности на устаревшем оборудовании при увеличении затрат на ремонт. Поэтому кривая изменения значений производительности труда может иметь экстремальный характер (кривая Π_p). Это необходимо учитывать при определении оптимальных сроков службы оборудования и при решении ряда других задач.

Введем обозначения: $\frac{T_n}{T_{ж}} = K, \frac{T_v}{T_{ж}} = m$, где K — показатель, характеризующий техническую вооруженность производства; m — коэффициент энергоматериалоемкости, т. е. отношение текущих затрат прошлого труда к затратам живого труда за одинаковый промежуток времени.

Показатели K и m характеризуют производство и могут быть использованы для предварительной оценки возможности автоматизации. Так, показатель технической вооруженности рабочего с годовой зарплатой 2000 р., обслуживающего токарный станок стоимостью 2000 р., равен $\frac{2000}{2000} = 1$, а обслуживающего участок автоматической линии стоимостью 100 000 р. будет равен $\frac{100\,000}{2000} = 50$.

При определении показателя m можно включать в текущие эксплуатационные затраты стоимость сырья, заготовок и т. д. В этом случае производительность труда будет оценена при обработке детали в целом. Если же необходимо рассчитать уровень производительности

труда данной машины для определения ее прогрессивности, то учитывают только затраты на ее эксплуатацию (инструмент, электроэнергия, ремонт и т. д.).

Подставив значение K и m в формулу (246), получим

$$\Pi = \frac{Q_r N}{T_{ж} [K + N(m + 1)]}. \quad (247)$$

Величина $\frac{Q_r}{T_{ж}}$ характеризует производительность живого труда, которая всегда больше истинных значений производительности труда, так как в ней не учитываются затраты на создание средств производства и на обеспечение их работоспособности.

Создание новой техники, автоматизации производственных процессов связаны, как правило, с удорожанием оборудования и дополнительными затратами. Это должно компенсироваться сокращением числа обслуживающего персонала и увеличением выпуска продукции таким образом, чтобы производительность труда увеличилась в соответствии с плановыми заданиями.

Примеры. На рис. 357 показаны изменения значений производительности труда для пяти вариантов автоматизации.

1. В варианте I четыре рабочих обслуживают четыре токарных станка. Годовой выпуск продукции — 500 шт/г, годовая заработная плата одного рабочего (затраты живого труда) — 2000 р., стоимость станков (единовременные затраты прошлого труда) — 8000 р., т. е. $K = \frac{T_n}{T_{ж}} =$

$$= \frac{8000}{4 \cdot 2000} = 1. \text{ Принимаем } m = 0,2. \text{ После пяти лет эксплуатации производительность [см. формулу (247)]}$$

$$\Pi_1 = \frac{500 \cdot 5}{8000 [1 + 5(0,2 + 1)]} \approx 0,045 \text{ шт/р.}$$

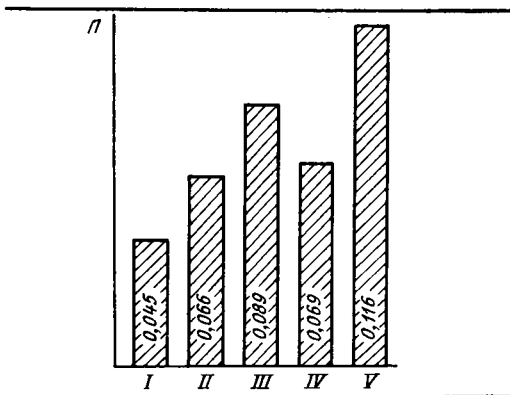


Рис. 357. Производительность труда P для пяти вариантов автоматизации

2. В варианте II удалось освободить двух рабочих за счет внедрения автоматизированных средств загрузки при сохранении величины годового выпуска. Это потребовало увеличения затрат на оборудование на 2000 р., т. е.

$$K = \frac{8000 + 2000}{4000} = 2,5.$$

В соответствии с определением изменится значение m , оно будет равно 0,4 (считаем, что годовые текущие затраты прошлого труда не изменились, т. е. $T_0 = \text{const}$). Тогда $P_{II} = \frac{500}{4000} \times$

$$\times \frac{5}{2,5 + 5(0,4 + 1)} \approx 0,066 \text{ шт/р.}$$

3. В случае, если оборудование сможет обслуживать один рабочий (вариант III), то при тех же затратах

$$P_{III} = \frac{500}{2000} \cdot \frac{5}{5 + 5(0,8 + 1)} \approx 0,089 \text{ шт/р.}$$

4. В варианте IV имеем автоматическую линию, обслуживаемую одним рабочим. Стоимость оборудования возросла в 3 раза по сравнению с первым вариантом при увеличении годового выпуска на 20%. Тогда

$$K = \frac{8000 \cdot 3}{2000} = 12, m = 0,2 \cdot 4 \cdot 1,2 = 0,96, \text{ а произ-} \\ \text{водительность труда через 5 лет — } P_{IV} = \\ = \frac{500 \cdot 1,2}{2000} \cdot \frac{5}{12 + 5(0,96 + 1)} = 0,069 \text{ шт/р.}$$

5. При увеличении годового выпуска в 2,5 раза (вариант V) $Q_r = 1250$ шт/г. и затрат на оборудование и автоматизацию в 3 раза, по сравнению с первым вариантом, т. е.

$$K = \frac{8000 \cdot 3}{2000} = 12 \text{ и } m = 2, \text{ производительность} \\ \text{труда возрастает до значения } P_V = \frac{1250}{2000} \times \\ \times \frac{5}{12 + 5(2 + 1)} \approx 0,116 \text{ шт/р.}$$

Рост производительности труда и уменьшение суммарных затрат осуществляются при увеличении затрат прошлого труда и сокращения затрат живого труда. Важным фактором роста производительности является рост производительности оборудования.

Важнейшим критерием оценки техники является рост производительности

общественного труда, который можно определить по формуле

$$\lambda = \frac{P_2}{P_1}. \quad (248)$$

где P_1 — производительность труда, которую обеспечивает первый (исходный) вариант техники; P_2 — производительность труда второго варианта техники, сравниваемого с исходным.

Сравнение можно проводить как между действующим и проектируемым оборудованием, так и между различными вариантами действующего.

Используя формулы (248) и (247), получим

$$\lambda = \frac{\frac{Q_{r2}}{T_{ж2}} \cdot \frac{N}{K_2 + N(m_2 + 1)}}{\frac{Q_{r1}}{T_{ж1}} \cdot \frac{N}{K_1 + N(m_1 + 1)}} = \\ = \frac{Q_{r2}}{Q_{r1}} \cdot \frac{T_{ж1}}{T_{ж2}} \cdot \frac{K_1 + N(m_1 + 1)}{K_2 + N(m_2 + 1)}. \quad (249)$$

Индексы в формуле соответствуют первому и второму варианту техники.

Технико-экономические показатели обоих вариантов удобно характеризовать безразмерными величинами:

$\varphi = \frac{Q_{r2}}{Q_{r1}}$ — рост производительности оборудования;

$\varepsilon = \frac{T_{ж1}}{T_{ж2}}$ — сокращение затрат живого труда;

$\sigma = \frac{T_{п2}}{T_{п1}}$ — изменение стоимости средств производства;

$\delta\varphi = \frac{T_{v2}}{T_{v1}}$ — изменение текущих эксплуатационных затрат, отражающее изменение затрат на единицу продукции.

Определим показатели K и m для второго варианта через показатели исходного варианта:

$$K_2 = \frac{T_{п2}}{T_{ж1}} = \frac{T_{п1} \sigma}{T_{ж1}} = \frac{T_{п1}}{T_{ж1}} \sigma \varepsilon = K_1 \sigma \varepsilon;$$

$$m_2 = \frac{T_{r2}}{T_{ж2}} = \frac{T_{v1} \delta\varphi}{T_{ж1}} = \frac{T_{v1}}{T_{ж1}} \delta\varphi \varepsilon = m_1 \delta\varphi \varepsilon.$$

Подставим значения K_2 , m_2 , φ и ε в формулу (249). Индекс, характеризующий коэффициенты первого варианта, можно опустить, так как теперь все па-

раметры выражены через показатели исходного варианта:

$$\lambda = \varphi \varepsilon \frac{K + N(m+1)}{K \delta \varepsilon + N(m \delta \varphi \varepsilon + 1)} \quad (250)$$

В полученной формуле рост производительности труда выражен через сравнительные технико-экономические показатели двух вариантов производства и сроки службы техники. Они позволяют выявлять наиболее перспективные и выгодные варианты автоматизации по критерию наибольшей производительности труда.

§ 2. Анализ производительности труда при автоматизации

При определении путей развития автоматизации, выборе варианта новой техники формула (250) позволяет выявить влияние различных факторов на производительность труда.

Произведение $\varphi \varepsilon$ представляет собой рост производительности живого труда:

$$\lambda_{ж} = \varphi \varepsilon \quad (251)$$

В случае, если производительность оборудования увеличилась, например, в 2 раза ($\varphi=2$) при сокращении числа обслуживающего персонала в 5 раз ($\varepsilon=5$), производительность живого труда увеличится в $\lambda_{ж}=10$ раз, следовательно, каждый рабочий будет вырабатывать в 10 раз больше продукции. Зарботную плату всего персонала, участвующих в производственном процессе, в этом случае считаем одинаковой. При необходимости можно провести корректирование, так как ε показывает отношение затрат на живой труд, т. е. величин суммарной зарплаты обслуживающего персонала при двух вариантах.

Однако совершенно очевидно, что рост производительности живого труда $\lambda_{ж}$ возможен при введении новой прогрессивной техники, автоматизированных средствах производства. Это требует дополнительных затрат, что скажется на росте производительности труда λ .

Часть формулы (250) характеризует относительную трудоемкость вариантов за N лет эксплуатации:

$$\psi = \frac{K \delta \varepsilon + N(m \delta \varphi \varepsilon + 1)}{K + N(m + 1)} \quad (252)$$

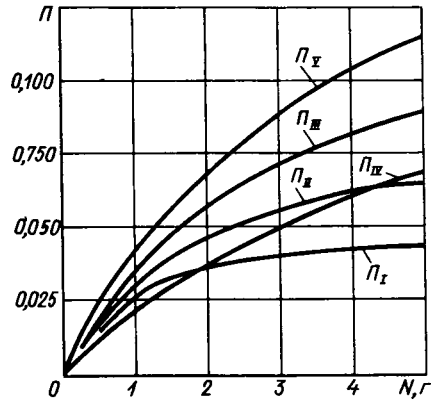


Рис. 358. Изменение производительности труда для вариантов автоматизации, приведенных на рис. 357

Из формул (250), (251) и (252) получим, что $\lambda = \frac{\varphi \varepsilon}{\psi} = \frac{\lambda_{ж}}{\psi}$.

Таким образом, производительность труда прямо пропорциональна росту производительности оборудования φ , сокращению затрат живого труда ε и обратно пропорциональна относительности трудоемкости ψ .

На рис. 358 даны графики изменения производительности труда для вариантов автоматизации, рассмотренных в примере при одновременном вводе техники в эксплуатацию.

Автоматическая линия Π_{IV} более дорогая, чем поточная Π_I , и в начале эксплуатации производительность труда на поточной линии выше, чем на автоматической. Однако благодаря более высокой производительности оборудования и малому числу обслуживающих рабочих рост производительности труда на автоматической линии более интенсивный, чем на поточной. Примерно после двух лет эксплуатации производительность на автоматической линии становится больше. Особенно важным является возможность значительного повышения производительности труда в процессе дальнейшей эксплуатации автоматической линии.

Сокращение числа обслуживающего персонала при постоянной производительности оборудования (Π_{II} , Π_{III}) дает определенный рост производительности труда, имеющий, однако, тенденцию

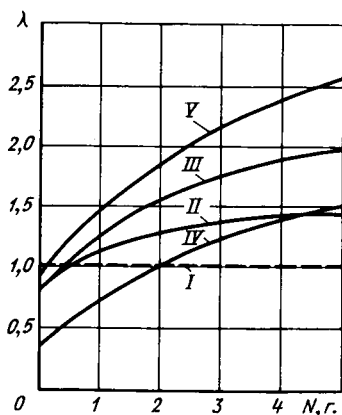


Рис. 359. Рост производительности труда рассматриваемых вариантов (см. рис. 357) по сравнению с поточной линией

к убыванию при увеличении сроков эксплуатации техники.

Увеличение производительности оборудования (Π_V) приводит к значительному росту производительности труда даже при некотором увеличении затрат.

На рис. 359 показан рост производительности труда λ для перечисленных выше вариантов автоматизации (см. рис. 357). За исходный вариант, с которым сравниваются остальные, взята поточная линия (вариант I).

Зная сравнительные технико-экономические показатели сопоставляемых вариантов производства, можно выбрать наиболее выгодный для любых сроков эксплуатации. Так, в нашем примере поточная линия для малых сроков эксплуатации будет более выгодной, чем автоматическая, как наиболее дешевая, несмотря на большие эксплуатационные расходы. Автоматическую линию выгоднее создавать, если предполагаемые сроки ее эксплуатации достаточно велики.

Большое влияние на эффективность новой техники оказывают сроки ее проектирования и освоения. Если новый вариант оборудования, например автоматическая линия, будет введен в эксплуатацию на семь лет позже, чем может начать работать сравниваемый с ним вариант, то сроки службы оборудования будут равны $N-L$ годам (где L — срок внедрения новой техники). Соответственно изменится и величина эксплуатационных затрат. Таким

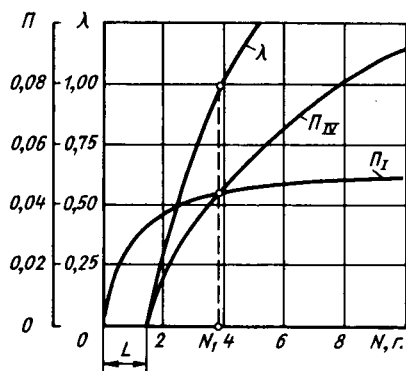


Рис. 360. Производительность труда двух вариантов производства при различных сроках ввода их в эксплуатацию

образом, производительность труда на этой автоматической линии

$$\Pi_2 = \frac{Q_T}{T_{жз}} \frac{N-L}{K_2 + (N-L)(m_2 + 1)} \quad (253)$$

Сравнивая производительности труда обоих вариантов автоматизации, получим

$$\lambda = \varphi e^{\frac{N-L}{N}} \frac{K + N(m+1)}{K_{се} + (N-L)(m\delta\varphi e + 1)} \quad (254)$$

Формула роста производительности труда (250) является частным случаем формулы (254) при $L=0$.

Проектирование, изготовление и отладка автоматической линии требует больше времени, чем создание поточной линии из имеющегося оборудования. Предположим, что этот срок равен 1,5 годам. Используя данные примера (см. рис. 358), получим графики изменения производительности труда Π_I и Π_{IV} и рост производительности труда λ для поточной и автоматической линий при разности сроков ввода их в эксплуатацию $L=1,5$ г. (рис. 360).

Графики показывают, что чем больше сроки освоения и ввода в эксплуатацию новой техники, тем ниже производительность труда для одного и того же варианта производства. Самые современные автоматизированные станочные системы могут оказаться невыгодными, если сроки ввода в эксплуатацию будут слишком продолжительными.

Сравнивая рис. 358 и 360, легко обнаружить, что для достижения производительности поточной линии Π_1 требуется значительно больше времени (N_1). Из этого можно сделать вывод, что при сроках эксплуатации не более четырех-пяти лет для нашего случая (см. рис. 360) поточная линия будет более выгодной.

Для определения прогрессивности новой техники необходимо сравнивать ее не только с возможными вариантами, но и с существующим производством, с лучшими из имеющихся вариантов техники.

На рис. 361 показана диаграмма роста производительности труда во времени при различных вариантах производства. Эту диаграмму можно использовать для оценки прогрессивности вводимой техники.

В каждый момент времени, который можно принять за исходный ($N=0$), имеется внедренная и действующая техника, характеризующая средний достигнутый уровень производительности труда. Внедренная R лет назад, она обеспечивает в настоящее время требуемую производительность труда

$$\Pi_0 = \frac{Q_0}{T_{\text{ж}}} \frac{R}{K+R(m+1)}.$$

При вводе в эксплуатацию новой техники (через L лет) ее производительность труда можно будет определить по формуле (254), а рост производительности труда по сравнению с существующей составит

$$\lambda = \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = \varphi e^{(N-L) \times \frac{\frac{K}{R} + m + 1}{K \sigma e + (N-L)(m \delta \varphi e + 1)}}. \quad (255)$$

При больших сроках эксплуатации существующей техники и незначительных затратах на ее создание для упрощения расчетов принимают $\frac{K}{R} = 0$. Тогда формула (255) будет иметь вид

$$\lambda = \varphi e^{(N-L) \frac{m+1}{K \sigma e + (N-L)(m \delta \varphi e + 1)}}.$$

На рис. 361 кривая λ_0 характеризует рост производительности труда существующей техники со средним уровнем производства, кривая λ_1 — рост производительности труда лучшей существующей техники, а прямая $\lambda_{\text{пл}}$ показывает запланированный рост производительности труда на данном производстве. На диаграмме видно, что техника со средним уровнем производства сможет обеспечивать плановый рост производительности труда только в течение ближайших 3—4 лет, а техника с более высоким уровнем производства — в течение 10—11 лет. Это объясняется тем, что существующая техника в значительной степени уже исчерпала свои возможности, и темпы роста производительности труда постепенно замедляются.

Для обеспечения дальнейшего роста производительности труда в соответствии с плановыми заданиями необходимо позаботиться о создании новой прогрессивной техники. На диаграмме она характеризуется кривой $\lambda_{\text{н}}$.

Для разработки и ввода в эксплуатацию этого варианта потребуется два года. Примерно через три года он достигнет планового роста производительности труда, а еще через год превысит рост производительности труда на лучшей существующей технике.

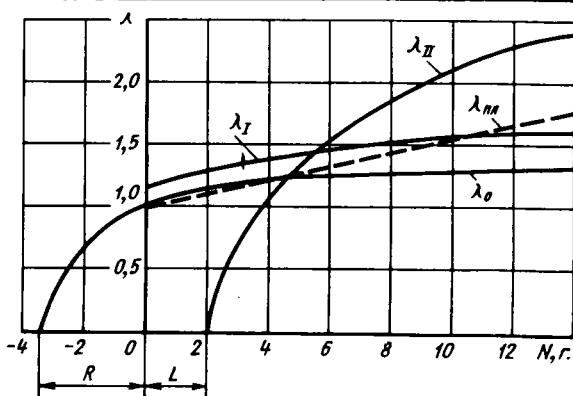
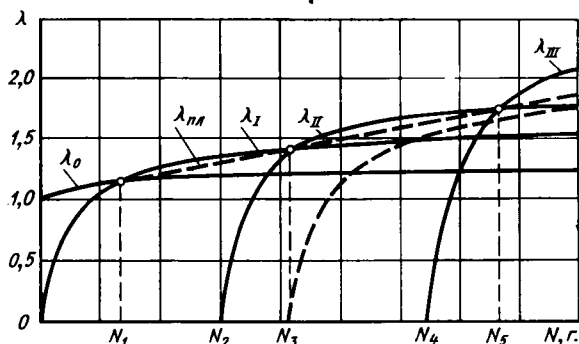


Рис. 361. Рост производительности труда при различных вариантах производства

Рис. 362. Прогрессивность новой техники в зависимости от сроков ее службы



Большим преимуществом вводимой техники (λ_{II}) является возможность значительного роста производительности труда после достижения заданного уровня, что предопределяет длительный срок службы и высокую экономическую эффективность. Своевременность замены существующей техники является одной из важнейших задач при автоматизации производственных процессов. Необходимо помнить, что и прогрессивная на сегодняшний день техника через определенное время морально устареет и станет тормозом для роста производительности труда, хотя оборудование будет вполне работоспособно. Изложенная методика оценки прогрессивности техники позволяет прогнозировать сроки рационального использования оборудования, ставить задачи по своевременному созданию новых вариантов производств.

На рис. 362 дана диаграмма, показывающая необходимость своевременной замены существующей техники для обеспечения постоянного планового роста производительности труда. Используя диаграмму, можно планировать сроки создания и пуска новой техники.

При плановом росте производительности труда $\lambda_{пл}$ существующая техника (λ_0) через N_1 лет должна быть заменена новой техникой (λ_I), которая, в свою очередь, через N_2 лет уже не обеспечит заданных темпов роста производительности труда. Это означает, что для поддержания темпов роста новый вариант техники должен готовиться заранее и быть пущенным в производство через N_2 лет, т. е. когда существующая техника еще вполне ус-

раивает производство. При пуске через N_3 лет (штриховая кривая) эта новая техника может уже морально устареть и не достигнуть требуемых значений $\lambda_{пл}$. Аналогично требует предварительной разработки и пуска через N_4 лет новейший вариант техники (λ_{III}), призванный своевременно (через N_5 лет) заменить введенную технику, характеризующуюся значениями λ_{II} .

§ 3. Основные направления развития автоматизации

Развитие техники заключается в совершенствовании ее технико-экономических показателей, что должно приводить к росту производительности труда.

Автоматизация производственных процессов является средством, призванным решать эту важнейшую задачу.

Одной из важных задач, решаемых при автоматизации производственных процессов, является задача сокращения числа обслуживающего персонала. Автоматические линии позволяют одному рабочему обслуживать большое число машин различного типа за счет использования специальных средств управления и контроля, применения вычислительной техники, создания автоматизированных средств производства. При этом стремятся улучшить условия труда, повышают требования к квалификации рабочих. Труд наладчиков становится близким к работе инженерно-технического персонала. Имеется возможность роста производительности труда за счет уменьшения затрат на живой труд. Рассмотрим характер роста

производительности труда при увеличении ϵ . Разделив числитель и знаменатель формулы (250) на ϵ , получим

$$\lambda = \varphi \frac{K + N(m+1)}{K\sigma + N\left(m\delta\varphi + \frac{1}{\epsilon}\right)} \quad (256)$$

Из формулы (256) видно, что измерения сокращения затрат живого труда ϵ неодинаково влияют на рост производительности труда λ . Изменение функции λ имеет гиперболический характер и при $\epsilon \rightarrow \infty$ имеет предел

$$\frac{\varphi[K + N(m+1)]}{K\sigma + Nm\delta\varphi},$$

к которому асимптотически приближается значение λ_I (рис. 363).

Таким образом, кривая роста λ показывает, что при постоянстве остальных параметров, входящих в формулу (256), рост производительности труда при увеличении степени многостаночного обслуживания при малых значениях ϵ достаточно интенсивен, а при дальнейшем росте имеет тенденцию к убыванию. В результате эффект от автоматизации с целью уменьшения числа обслуживающего персонала на разных этапах будет различным.

Наибольший эффект (рост λ) следует ожидать в случаях автоматизации производственных процессов, в которых до автоматизации использовалось большое количество ручного труда. Значительно меньший эффект будет в слу-

чаях автоматизации объектов, где первые этапы работы по сокращению числа обслуживающего персонала прошли и ручной труд значительно сокращен.

Кривая λ_I показывает рост производительности труда без учета дополнительных затрат на автоматизацию. Однако для того, чтобы обеспечить высокие показатели многостаночного обслуживания, требуется создание сложных автоматизированных станочных систем. Это требует дополнительных затрат, которые будут тем больше, чем выше уровень автоматизации, т. е. чем выше ϵ .

Кривая λ_{II} построена с учетом дополнительных затрат на автоматизацию. Потери темпа роста, а затем снижение производительности труда связаны с этими затратами. Таким образом, автоматизация только с целью уменьшения числа обслуживающего персонала может быть экономически невыгодной, что особенно часто происходит при значительной стоимости оборудования и средств автоматизации, т. е. больших значений коэффициента технической вооруженности K .

На рис. 363 показана зависимость роста производительности труда λ от сокращения затрат живого труда ϵ при различных значениях коэффициента технической вооруженности K . Автоматизация в этом случае является эффективной, когда еще имеется значительный удельный вес затрат живого труда, т. е. при малых значениях K .

Важным направлением в развитии автоматизации для обеспечения максимального роста производительности труда является уменьшение затрат на оборудование и средства автоматизации. Для этого необходимо широкое внедрение стандартизации и унификации оборудования, поточных методов производства, непрерывное совершенствование технологии изготовления.

Получили широкое распространение агрегатные станки и автоматические линии на основе стандартных деталей. Непрерывно повышается уровень унификации выпускаемого оборудования и средств автоматизации. Внедрение стандартов позволяет не только уменьшить стоимость, сократить сроки проектирования и изготовления, но и значительно сократить время и затраты

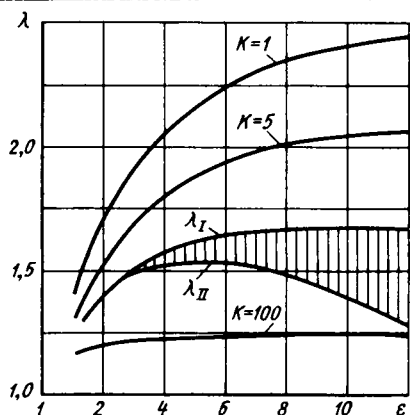


Рис. 363. Зависимость роста производительности труда от сокращения затрат живого труда

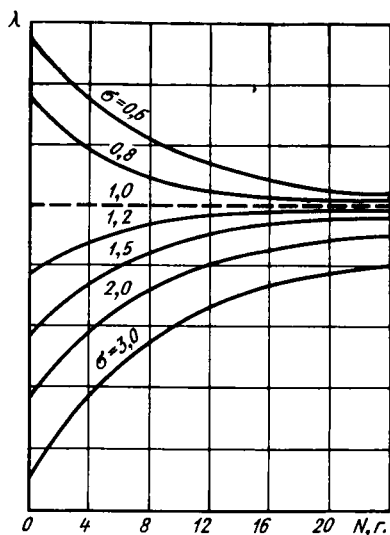


Рис. 364. Зависимость роста производительности труда от сроков службы при различных затратах прошлого труда

на ремонт при эксплуатации автоматических линий, повысить их производительность.

В промышленности создаются унифицированные размерные ряды (гаммы) металлорежущих станков, увеличивается выпуск унифицированных механизмов и деталей.

Для сокращения затрат на автоматизацию необходимо иметь оборудование, приспособленное для встраивания в автоматические линии. Такие станки можно применять как в условиях автоматизированного производства, так и автономно. Это позволяет наладить их выпуск в больших масштабах, создавать стабильные и более дешевые конструкции, надежные в эксплуатации. На рис. 364 дана зависимость λ от сроков службы различных затратах прошлого труда.

Важнейшим направлением работ по повышению производительности труда при автоматизации является повышение производительности средств производства, т. е. роста φ . На рис. 365 даны графики зависимости производительности труда от роста производительности оборудования φ при различных текущих затратах, характеризуемых

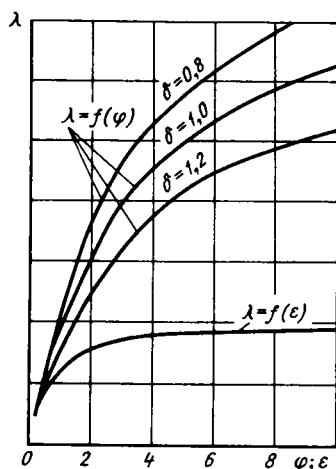


Рис. 365. Рост производительности труда в зависимости от повышения производительности оборудования и сокращения затрат живого труда

мым коэффициентом δ . Для сравнения там же приведен график изменения производительности труда в зависимости от коэффициента ϵ , характеризующего изменение числа обслуживающего персонала.

Потенциал роста производительности труда при увеличении производительности средств производства значительно выше, чем при сокращении затрат живого труда, что позволяет считать этот путь наиболее эффективным. Рост производительности оборудования может быть достигнут за счет использования новых технологических процессов, увеличения режимов обработки, сокращения холостых ходов и уменьшения внецикловых потерь. В ряде случаев это требует создания принципиально новых конструкций автоматов и автоматических линий, использования более совершенных методов организации труда.

Анализ влияния совершенствования отдельных показателей на рост производительности труда показывает большие возможности автоматизации. Максимальный эффект достигается при разумном сочетании значений всех показателей, влияющих на рост производительности общественного труда.

§ 1. Структура автоматических линий

Автоматические линии могут быть выполнены по различным структурным вариантам.

От выбора структуры линии во многом зависят ее производительность и другие технико-экономические показатели. На рис. 366 даны структурные варианты линий машин последовательного действия.

При отсутствии межоперационных заделов все станки сблокированы между собой и работают в едином ритме.

Остановка любого агрегата вызывает простой всей системы машин. Такой структурный вариант называют линией с жесткой межагрегатной связью (рис. 366,а).

Автоматические линии могут быть разделены на участки с наличием между ними устройств для приема, хранения и выдачи заготовок (рис. 366,б). В этом случае жесткая межагрегатная связь имеется только внутри участка. Межоперационные запасы могут обеспечить работу линии при вышедшем из строя участке до тех пор, пока это позволяют их емкости. Накопителями заделов могут быть специальные магазины и бункеры, а также сами транспортные устройства (лотки, конвейеры).

Автоматической линией с гибкой межагрегатной связью называют линию, в которой межоперационные накопители заделов установлены между всеми технологическими машинами (рис. 366,в). В этом случае взаимное влияние соседних агрегатов может быть сведено до минимума при достаточных емкостях межоперационных накопителей. Однако дополнительные потери все же будут иметь место, так как реально допустимые запасы полуфабрикатов ограничены.

Для поточных линий характерно наличие значительных запасов заготовок между станками. При этом предусматривается работа оператора, который осуществляет загрузку и выгрузку обрабатываемых деталей (рис. 366,г). Производительность линий определяется обычно производительностью лимитирующего станка, т. е. станка, имеющего меньшую производительность.

Производительность станков в поточной линии почти соответствует производительности этих станков при эксплуатации вне линии.

Рассмотренные варианты являются примером однопоточных линий последовательного действия, когда производительность автоматической системы может быть повышена рациональным делением линии на секции и введением промежуточных накопителей.

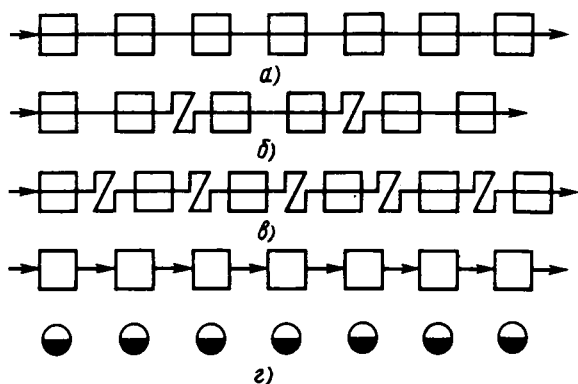


Рис. 366. Структурные варианты линий машин последовательного действия

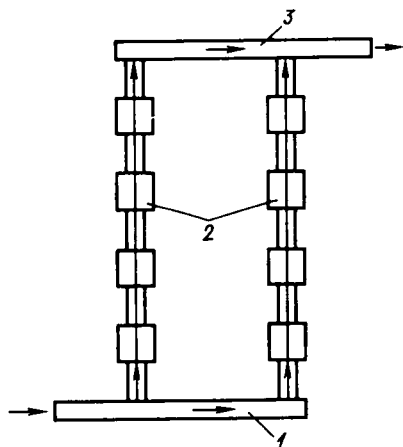


Рис. 367. Схема компоновки двухпоточной автоматической линии

В некоторых случаях увеличение фактической производительности можно осуществить введением независимых параллельно действующих потоков. На рис. 367 показана компоновка двухпоточной автоматической линии.

Загрузка линии осуществляется с конвейера 1 на оба потока, где заготовки последовательно обрабатываются на жестко заблокированных станках 2. Выдача обработанных деталей производится конвейером 3. Оба конвейера предусматривают определенную очередность загрузки и выгрузки деталей. При отказе какого-либо агрегата останавливается соответствующий поток, а другой поток может продол-

жать работу. На линии могут быть предусмотрены накопители деталей, которые разделят поток на участки или обеспечат заделы на границах потока.

Число потоков в автоматической линии может быть переменным. На рис. 368 дана схема трехсекционной линии с различным числом потоков в каждой из них. Первая секция имеет три потока, которые загружаются конвейером 1. В каждом потоке установлены четыре жестко заблокированных агрегата 2, выдающих отработанные детали на конвейер 3. С конвейера 3 детали попадают для обработки на вторую однопоточную секцию, состоящую из двух агрегатов 4. Затем конвейер 5 подает детали в третью секцию, представляющую собой двухпоточную систему с тремя агрегатами 6 в каждой. Обработанные заготовки отводятся конвейером 7.

В автоматических линиях с переменной структурой можно обеспечить наиболее рациональное использование станков при минимальном их числе. Трудности реализации этих схем заключаются в усложнении систем управления и транспортных механизмов.

Для осуществления большинства технологических процессов возможно использование большого числа вариантов: от простейших поточных линий до сложных автоматических станочных систем с многопоточной обработкой, деление линий на участки и создание межоперационных накопителей заделов.

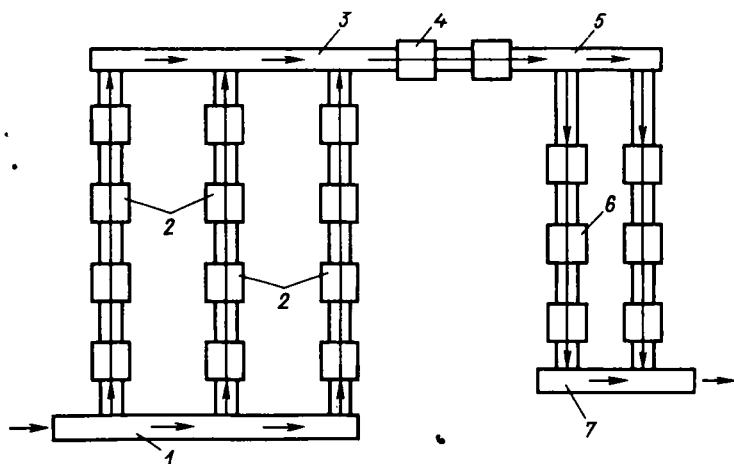


Рис. 368. Схема автоматической линии с переменным числом потоков

§ 2. Производительность автоматических линий при различных структурных вариантах

Автоматические системы машин различных структурных вариантов имеют неодинаковую производительность даже при одинаковых собственных потерях и других характеристиках станков, входящих в систему машин.

Поточная линия предусматривает независимую друг от друга работу входящего в нее оборудования при наличии достаточного объема межоперационных заделов заготовок. Собственные внецикловые потери одного станка без учета времени на переналадку состоят из потерь по инструменту и оборудованию, а также потерь на обслуживание линии, связанных с необходимостью ее останова (уборка стружки, очистка, подготовка к работе и др.).

В этом случае коэффициент использования поточной линии

$$\eta_{ис} = \frac{T}{T + t_n} = \frac{1}{1 + \frac{t_n}{T}} = \frac{1}{1 + B},$$

где t_n — собственные внецикловые потери станка, приходящиеся на единицу продукции; B — коэффициент, показывающий соотношение внецикловых потерь и потерь рабочего цикла.

Производительность поточной линии

$$Q = Q_d \eta_{ис} = \frac{1}{T} \frac{1}{1 + \frac{t_n}{T}} = \frac{1}{T} \frac{1}{1 + B}. \quad (257)$$

В автоматической линии кроме вышечисленных внецикловых потерь существуют дополнительные, которые связаны с взаимным влиянием машин, заблокированных в автоматическую систему. При жесткой связи выход из строя любого механизма какого-либо станка приводит к остановке всей автоматической линии. Таким образом, коэффициент использования автоматической линии с жесткой связью

$$\eta_{а.л} = \frac{T}{T + t_{пг}} = \frac{1}{1 + B_q} = \frac{1}{1 + B_0}, \quad (258)$$

где q — число станков (рабочих позиций) в линии; B_0 — суммарные внецикловые потери линии с жесткой связью, отнесенные к рабочему циклу.

Для уменьшения внецикловых потерь автоматические линии делают на участках, между которыми устанавливают магазины-накопители, компенсирующие простои соседних участков.

При достаточной емкости магазинов-накопителей можно полностью компенсировать простои соседних участков. В этом случае производительность автоматической линии

$$Q_{а.л} = \frac{K}{1 + K t_{x.x} + K \left[(c_i + t_e) \frac{q}{n_y} + t_m \right]} = \frac{K}{1 + K t_{x.x} + K t_{yч}}, \quad (259)$$

$$t_{yч} = (c_i + t_e) \frac{q}{n_y} + t_m,$$

где c_i — потери по инструменту; t_e — потери по оборудованию; n_y — число участков в линии; $\frac{q}{n_y}$ — число станков, заблокированных в одном участке; t_m — потери магазина-накопителя на границе участка; $t_{yч}$ — общие потери участка.

Однако емкость магазинов-накопителей всегда ограничена, что может приводить к дополнительным потерям, связанным с недостаточной надежностью работы соседних участков. Эти дополнительные потери на каждом участке автоматической линии зависят от ее компоновки и снижают общую производительность.

Производительность автоматической линии с учетом собственных и дополнительных потерь

$$Q_{а.л} = \frac{K}{1 + K t_{x.x} + K t_{yч} W}, \quad (260)$$

где W — коэффициент возрастания внецикловых потерь, учитывающий влияние соседних участков.

Для определения значения коэффициента W необходимо знать величины простоев всех станков и устройств, из которых скомпонована автоматическая линия. В общем случае эти простои на каждом участке различны, являются случайными величинами и подчиняются законам случайного распределения, что требует для их определения достаточ-

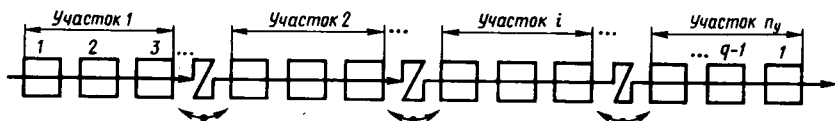


Рис. 369. Схема для определения коэффициентов возрастания внецикловых потерь

ного количества статистических данных и знания законов формирования отказов механизмов автоматических линий.

В тех случаях, когда линия разделена на участки с равными потерями при одинаковом цикле работы всех участков (один из принципов компоновки автоматических станочных систем), решение задачи по определению W значительно упрощается.

Емкость накопителя влияет на величину потерь участка, связанных с простоем соседних участков. Обозначим через Δ коэффициент межучасткового наложения потерь. Величина Δ зависит от емкости накопителя и изменяется в пределах $0 \leq \Delta \leq 1$.

При накопителе большой емкости, который полностью компенсирует потери соседнего участка, $\Delta = 0$; при отсутствии накопителя, т. е. в линиях с жесткой связью, $\Delta = 1$. В остальных случаях накопитель лишь частично компенсирует потери соседнего участка. Величина этой компенсации равна $(1 - \Delta)t_{yч}$.

На рис. 369 приведена схема для определения коэффициента возрастания внецикловых потерь. Рассмотрим участок i автоматической линии. Простои всех расположенных перед ним участков приводят к его дополнительным простоям из-за нехватки заготовок. Простои участков, следующих за участком i , вызывают его дополнительные простои из-за переполнения накопителей.

Собственные потери участка i линии

$$t_1 = t_{yч} = (c_i + t_e) \frac{q}{n_y} + t_m. \quad (261)$$

Считаем, что потери в магазине-накопителе по сравнению с величиной потерь по оборудованию и инструменту незначительны и обозначим их $t_n = c_i + t_e$, тогда

$$t_1 = t_n \frac{q}{n_y}. \quad (262)$$

Потери участка 2 будут включать простои по вине участка 1, но благодаря магазину-накопителю между этими участками простои будут уменьшены на величину $(1 - \Delta)t_{yч}$, т. е.

$$\begin{aligned} t_2 &= t_{yч} + t_1 - (1 - \Delta)t_{yч} = \\ &= (1 + \Delta)t_{yч}. \end{aligned} \quad (263)$$

Аналогично для участка 3

$$\begin{aligned} t_3 &= t_{yч} + t_2 - (1 - \Delta)t_{yч} = \\ &= (1 + 2\Delta)t_{yч} = t_{yч} + t'_d, \end{aligned}$$

где t'_d — дополнительные потери третьего участка из-за нехватки заготовок на предыдущих участках.

В общем случае для участка i $t'_{di} = \Delta(i - 1)t_{yч}$.

Аналогично определяют дополнительные потери участка i из-за избытка заготовок, вызванного простоями всех последующих участков.

Окончательно получим

$$\begin{aligned} t_n &= t_{yч} + t_n \frac{q}{n_y}; \\ t_{n-1} &= t_{yч} + t_n - (1 - \Delta)t_{yч} = \\ &= t_{yч} + \Delta t_{yч}; \\ t_{n-2} &= t_{yч} + t_{n-1} - (1 - \Delta)t_{yч} = \\ &= t_{yч} + 2\Delta t_{yч} = t_{yч} + t'_d. \end{aligned}$$

В общем случае для участка i

$$t'_{di} = \Delta(n_y - i)t_{yч}.$$

Полные потери участка i складываются из собственных потерь и дополнительных потерь из-за избытка и недостатка заготовок:

$$\begin{aligned} t_i &= t_{yч} + t'_{di} + t'_{di} = \\ &= t_{yч} [1 + \Delta(n_y - 1)]. \end{aligned} \quad (264)$$

Из формул (260) и (264) получим

$$t_i = t_{yч} W = t_{yч} [1 + \Delta(n_y - 1)],$$

отсюда коэффициент возрастания внецикловых потерь

$$W = 1 + \Delta (n_y - 1). \quad (265)$$

Этот коэффициент одинаков для любого из участков автоматической линии. Вид дополнительных потерь зависит от места расположения участка в линии. Участки, расположенные в начале линии, больше простаивают из-за переполнения последующих участков, а участки в конце линии — из-за отсутствия заготовок в накопителях.

С учетом коэффициента возрастания потерь формула (259) будет иметь вид

$$Q = \frac{K}{1 + K t_{x,x} + K(c_i + t_e) \frac{q}{n_y} [1 + \Delta (n_y - 1)]}. \quad (266)$$

Формула (266) может быть использована для всех возможных структурных вариантов систем машин.

Поточная линия предусматривает наличие гарантированных заделов, т. е. влияние соседних машин и позиций отсутствует (см. рис. 366,з). В этом случае $\Delta = 0$, а $n_y = q$, следовательно, $W = 1$. Подставляя эти значения в формулу (266), получим формулу производительности поточной линии:

$$Q = \frac{K}{1 + K t_{x,x} + K t_{п,q}}. \quad (267)$$

Автоматическая линия с жесткой связью (см. рис. 366,а) состоит из $n_y = 1$ участков, в ней нет промежуточных заделов — накопителей. Потери соседних станков и участков полностью суммируются при определении общих потерь линии. При $n_y = 1$, $\Delta = 1$ формула (266) примет вид

$$Q = \frac{K}{1 + K t_{x,x} + K t_{п,q}}. \quad (268)$$

Для автоматической линии с гибкой связью (см. рис. 366,в) $n_y = q$, $\Delta > 0$, т. е. $W > 1$ формула производительности имеет вид

$$Q = \frac{K}{1 + K t_{x,x} + K t_{п,q} [1 + \Delta (n_y - 1)]}. \quad (269)$$

Все промежуточные структурные варианты могут быть проанализированы

с помощью формулы (266). На рис. 370 показана зависимость производительности Q станочных линий различного типа от числа участков n_y и коэффициента Δ межузасткового наложения потерь. Наибольшую производительность имеет поточная линия, так как в ней отсутствуют влияние друг на друга соседних станков и позиций, наименьшая производительность у автоматической линии с жесткой связью, где это влияние максимальное.

Изменение производительности автоматических линий остальных вариантов (для этих вариантов $\Delta_1 = 0,1$; $\Delta_2 = 0,2$; и $\Delta_3 = 0,3$) показывает, что в начальный период увеличения числа участков рост производительности более интенсивен, а затем убывает. При этом пределы рационального увеличения числа участков тем выше, чем меньше влияние друг на друга соседних участков.

Обобщенные формулы коэффициента использования автоматических линий можно получить, подставляя в формулу (258) величины общих потерь с учетом коэффициента их возрастания:

$$\eta_{a,l} = \frac{1}{1 + t_{п,q} \frac{q}{n_y} \frac{1 + \Delta (n_y - 1)}{T}}, \quad (270)$$

или

$$\eta_{a,l} = \frac{1}{1 + B \frac{q}{n_y} [1 + \Delta (n_y - 1)]}.$$

Приведенные формулы позволяют анализировать различные структурные варианты систем машин и выбирать из них лучшие. Допущения, принятые при выводе формул, могут внести

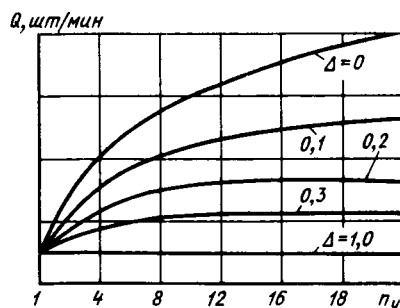


Рис. 370. Зависимость производительности Q автоматической линии от числа участков n_y и коэффициента Δ межузасткового наложения потерь

некоторые погрешности в расчеты. На практике потери на участках или соседних станках автоматических линий могут быть различны. В этих случаях требуется проведение сложных и трудоемких наблюдений с математической обработкой результатов для определения действительных значений Δ . Значительную помощь в этом может оказать математическое моделирование работы автоматических линий и использование ЭВМ.

§ 3. Расчет числа участков автоматической линии

При объединении станков в автоматические линии необходимо определить число машин, сблокированных в линию с жесткой связью. Наличие единого конвейерного устройства и жесткой связи между станками с последовательным прохождением детали всех стадий обработки является лучшим вариантом.

Однако недостаточно высокая надежность механизмов и инструментов приводит к снижению производительности автоматической линии с жесткой связью по сравнению с производительностью поточной линии из тех же станков. Деление автоматической линии на участки, между которыми расположены магазины-накопители, позволяет повысить производительность линии (см. рис. 370), но при этом увеличиваются затраты на автоматизацию и растет величина незавершенного производства.

Основным критерием при выборе оптимального структурного варианта линии является рост производительности труда (см. гл. 41), который позволяет учитывать рост производительности линии, изменение общей стоимости и эксплуатационных затрат, сокращение числа обслуживающего персонала, сроки службы и др. Для решения задачи выбора числа участков требуется сопоставление параметров поточной и автоматической линии из одних и тех же станков

Достаточную точность при расчетах можно получить, приняв следующие допущения: 1) число станков (позиций) в автоматической и поточной линиях одинаково; потери на всех стан-

ках равны; 2) межоперационные заделы поточной линии позволяют исключить зависимость станков друг на друга, в автоматической линии с жесткой связью выход из строя любого станка приводит к простоям всех остальных; 3) эксплуатационные затраты (на электроэнергию, ремонт, вспомогательные материалы и т. д.) возрастают во столько раз, во сколько выше стоимость автоматической линии по сравнению с поточной; 4) затраты на средства автоматизации не зависят от числа позиций, т. е. считаем, что основная часть затрат на средства автоматизации идет на общие для всей линии механизмы и устройства (система управления, привод конвейера, накопители и т. д.).

Рост производительности труда поточной линии по сравнению с автоматической определяют по формуле

$$\lambda = \frac{P_{a.l}}{P_{п.л}} \quad (271)$$

Согласно формуле (250) получим

$$\lambda = \varphi \frac{K + N(m + 1)}{K\sigma + N\left(m\delta\varphi + \frac{1}{\varepsilon}\right)}$$

Выразим технико-экономические показатели сравниваемых автоматической и поточной линий с учетом числа станков (позиций), входящих в эти линии.

Используя формулы (257), (258), рост производительности оборудования можно выразить так:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{Q_{a.l}}{Q_{п.л}} = \frac{Q_{ц.a.l}}{1 + Bq} \cdot \frac{1 + B}{Q_{ц.п.л}} \\ &= \gamma \frac{1 + B}{1 + Bq}, \end{aligned} \quad (272)$$

где $\gamma = \frac{Q_{ц.a.l}}{Q_{ц.п.л}}$ — коэффициент роста цикловой производительности.

Изменение стоимости автоматической линии по сравнению с поточной определяют по формуле

$$\sigma = \frac{T_{п.a.l}}{T_{п.п.л}} = \frac{Mq + \alpha M}{Mq} = 1 + \frac{\alpha}{q}, \quad (273)$$

где M — усредненная стоимость одного станка линии; α — коэффициент относительной стоимости комплекта средств автоматизации по сравнению с усредненной стоимостью одного станка.

Живой труд при обслуживании автоматической линии по сравнению с по-

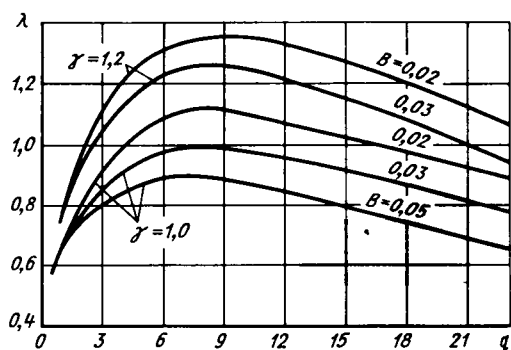


Рис. 371. Зависимость роста производительности λ автоматической линии от числа позиций q

точной сократится следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{T_{ж.п.л.}}{T_{ж.а.л.}} = \frac{\frac{q}{z_{о.п.л.}} Z_{о.п.л.} + \frac{q}{z_{н.п.л.}} Z_{н.п.л.}}{\frac{q}{z_{н.а.л.}} Z_{н.а.л.}}, \quad (274)$$

где $z_{о.п.л.}$, $z_{н.п.л.}$ — число станков, обслуживаемых соответственно одним оператором и одним наладчиком, на поточной линии; $z_{н.а.л.}$ — число станков, обслуживаемых наладчиком, на автоматической линии; $Z_{о.п.л.}$, $Z_{н.п.л.}$ — условная годовая заработная плата соответственно одного оператора и одного наладчика поточной линии; $Z_{н.а.л.}$ — условная годовая заработная плата наладчика автоматической линии.

Из формулы (274) видно, что при принятых допущениях величина ε не зависит от числа станков (позиций) сравниваемых линий.

Следуя допущению 3, получим

$$\delta\varphi = \sigma = 1 + \frac{\alpha}{q}. \quad (275)$$

После подстановки формул (272) — (275) в формулу (271) получим

$$\lambda = \gamma \frac{1+B}{1+Bq} \frac{K+N(m+1)}{(K+Nm)\left(1+\frac{\alpha}{q}\right) + \frac{N}{\varepsilon}}. \quad (276)$$

Формула (276) позволяет анализировать влияние числа q жестко заблокированных позиций на рост производительности труда при различных технико-экономических параметрах станочных линий.

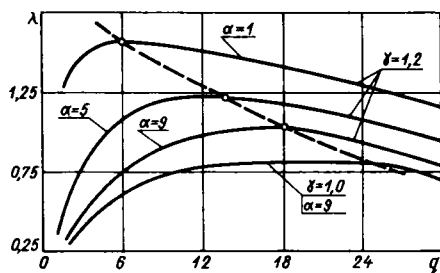


Рис. 372. Зависимость роста производительности от числа позиций при различных затратах на автоматизацию

На рис. 371 даны графики изменения λ в зависимости от q .

Наибольшее влияние на рост производительности труда оказывает коэффициент γ роста цикловой производительности оборудования. Это подтверждает ранее высказанное положение о том, что наибольший эффект при автоматизации производственных процессов можно получить лишь при создании станочных систем из высокопроизводительного оборудования. Коэффициент B , характеризующий надежность оборудования, с увеличением внецикловых потерь уменьшает значение λ . При этом число позиций, которые можно объединить в автоматическую линию с жесткой связью, уменьшается. И наоборот, чем более надежное оборудование объединяется в автоматическую линию, тем более длинная цепочка из жестко связанных станков допустима.

Формула (276) может быть использована для оценки целесообразности выбора поточной или автоматической линии на стадии проектирования. При незначительном росте цикловой производительности и малой надежности поточная линия может быть более эффективна, чем автоматическая ($\gamma=1$). Деление же автоматических линий на участки приведет к еще большему снижению экономического эффекта, так как потребуются дополнительные затраты. В то же время высокопроизводительное оборудование, надежное в эксплуатации ($\gamma=1,2$), целесообразно объединять в автоматические линии.

Затраты на автоматизацию также влияют на выбор структуры линий. На рис. 372 показана зависимость роста производительности труда λ от числа жестко заблокированных позиций при различных затратах на автоматизацию характеризуемых α . Увеличение этих затрат уменьшает производительность труда. Одновременно максимумы кривых смещаются вправо, т. е. для получения максимального роста производительности труда требуется создавать автоматические линии с большим числом позиций. Это объясняется тем, что увеличенные затраты на автоматизацию выгоднее распределять на большее число станков для уменьшения их влияния на рост производительности труда.

Штриховая кривая на рис. 372 показывает общую тенденцию увеличения числа станков с жесткой связью при увеличении затрат на средства автоматизации для обеспечения максимального роста производительности труда на автоматической линии.

Для определения числа позиций $q_{\max}$, которое соответствует максимальному росту производительности труда, надо взять частную производную от λ по q и приравнять ее к нулю [λ определяют по формуле (276)]. В результате получим

$$q_{\max} = \sqrt{\frac{\alpha}{B} \frac{K + Nm}{K + N \left(m + \frac{1}{\varepsilon} \right)}}. \quad (277)$$

или

$$q_{\max} = \mu \sqrt{\frac{\alpha}{B}},$$

$$\text{где } \mu = \sqrt{\frac{K + Nm}{K + N \left(m + \frac{1}{\varepsilon} \right)}}.$$

Формулы (276) и (277) позволяют анализировать любые варианты структур автоматических линий. Блокируя в линию требуемое число станков, можно обеспечить необходимый рост производительности труда. Одновременно можно определить требования к уровню надежности станков линии, допускаемым затратам на дополнительную автоматизацию, срокам службы оборудования и другим технико-экономическим показателям.

В случае, если технологический процесс позволяет получить требуемое число позиций $q_{\max}$, автоматическая линия

будет одноучастковой, т. е. все станки соединены между собой жестко и промежуточные магазины-накопители отсутствуют. При $q_{\text{тех}} > q_{\max}$ число участков линии определяют по формуле

$$n_y = \frac{q_{\text{тех}}}{q_{\max}}, \quad (278)$$

где $q_{\text{тех}}$ — число позиций в линии, определяемое технологическим процессом.

Пример. Выберем оптимальную структуру автоматической линии агрегатных станков для обработки корпусной детали. При разработке технологического процесса получили $q_{\text{тех}} = 20$. Средние потери времени на рабочей позиции, полученные при наблюдениях за работой станков подобного типа, характеризуются $B = 0,02$. Срок службы линии 10 лет.

Стоимость всех станков линии $T_{\text{п.пл}} = 180\,000$ р. Усредненная стоимость одного станка

$$M = \frac{180\,000}{20} = 9000 \text{ р.}$$

Общие затраты на создание автоматической линии с жесткой связью включают в себя стоимость конвейера (15 000 р.) поворотного стола (4000 р), накопителя (7000 р.) и дополнительные затраты на гидравлическую и электрическую аппаратуру (4000 р.); всего 30 000 р. Коэффициент относительной стоимости средств автоматизации

$$\alpha = \frac{30\,000}{9000} \approx 3,33.$$

Текущие расходы на эксплуатацию линии состоят из затрат на текущий ремонт и техническое обслуживание, расходы на инструмент и электроэнергию. Они определяются по нормам, существующим на предприятиях для станочных линий данного типа. Сюда могут быть включены и некоторые другие виды затрат на обслуживание оборудования.

Для нашего случая годовые затраты на ремонт и обслуживание составляют 15 000 р., расходы на инструмент 1500 р., на электроэнергию 3500 р., т. е. всего $T_{\text{в.пл}} = 20\,000$ р.

Поточную линию в нашем примере обслуживают 20 операторов (по числу станков) и 4 наладчика. Среднемесячная зарплата оператора составляет 150 р., а наладчика — 200 р. При двухсменной работе годовые затраты живого труда

$$T_{\text{ж.п.л}} = (150 \cdot 20 + 200 \cdot 4) \cdot 2 \cdot 12 = 91\,200 \text{ р.}$$

Полученные данные позволяют определить значения технико-экономических показателей, необходимых для выбора оптимальной структуры линии.

Коэффициент технической вооруженности для поточной линии

$$K = \frac{T_{\text{п.п.л}}}{T_{\text{ж.п.л}}} = \frac{180\,000}{91\,200} \approx 1,97.$$

Коэффициент энергоматериалоемкости для поточной линии

$$m = \frac{T_{\text{в.п.л}}}{T_{\text{ж.п.л}}} = \frac{20\,000}{91\,200} \approx 0,22.$$

Для обслуживания автоматической линии требуются только наладчики, поэтому коэффициент сокращения затрат живого труда рассчитывают так:

$$\epsilon = \frac{T_{ж. п. л.}}{T_{ж. а. л.}} = \frac{\frac{Z_{0 п. л.}}{z_{0 п. л.}} + \frac{Z_{н п. л.}}{z_{н п. л.}}}{\frac{Z_{н а. л.}}{z_{н а. л.}}} =$$

$$= \frac{\frac{150}{1} + \frac{200}{5}}{\frac{200}{5}} = 4,75.$$

Цикловую производительность станков в автоматической линии с жесткой связью и поточной линии считаем одинаковой, т. е. $\gamma = 1$. Тогда после подстановки значений всех параметров в формулу (277) определим оптимальное число станков, которые целесообразно объединить в автоматическую линию с жесткой связью для достижения максимального роста производительности труда:

$$q_{\max} = \sqrt{\frac{3,33}{0,02} \frac{1,97 + 10 \cdot 0,22}{1,97 + 10 \left(0,22 + \frac{1}{4,75} \right)}} =$$

$$= 10,5.$$

Полученное значение $q_{\max}$ позволяет рекомендовать структурный вариант автоматической линии с двумя участками по 10 станков в каждом. В этом случае будет достигнут максимальный рост производительности труда по сравнению с поточной линией из этих же станков, который равен по формуле (276)

$$\lambda = 1 \frac{1 + 0,02}{1 + 0,02 \cdot 10} \times$$

$$\times \frac{1,97 + 10(0,22 + 1)}{(1,97 + 10 \cdot 0,22) \left(1 + \frac{3,33}{10} \right) + \frac{10}{4,75}} = 1,58.$$

На рис. 373 даны зависимости роста производительности λ от числа позиций $q = q_{\max}$, которые характеризуют максимальное значение λ .

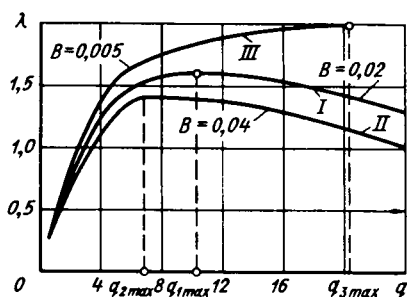


Рис. 373. Рост производительности труда для трех вариантов автоматических линий в зависимости от числа позиций

Кривая I характеризует рост производительности выбранной автоматической линии по сравнению с поточной. Двухучастковая линия является оптимальным вариантом. Одноучастковая линия с $q = 20$ снизила бы рост производительности труда за 10 лет эксплуатации с 58% до 47%. Трехучастковая линия с $q = 6 \div 7$ также дает понижение роста производительности труда до 50%.

В случае компоновки автоматической линии из менее надежного в работе оборудования с $B = 0,04$ (кривая II на рис. 373) трехучастковая линия является наиболее выгодным вариантом. При необходимости создания высокопроизводительной одноучастковой линии с жесткой связью требования к показателям надежности увеличиваются. В нашем случае коэффициент B должен достигать значения 0,005 (кривая III на рис. 373).

§ 4. Емкость межоперационных накопителей

Межоперационные накопители позволяют компенсировать потери производительности линий за счет уменьшения влияния простоев соседних станков и участков. Число накопителей зависит от числа участков линии. Их устанавливают на границах участков.

В гл. 32 были рассмотрены конструкции бункерных и магазинных устройств. При выборе емкости накопителей, необходимо учитывать величины простоев участков линии, производительность оборудования и дополнительные затраты на создание накопителей и встраивание их в автоматические линии. Имеются также ограничения по числу находящихся на линии заготовок на промежуточных операциях. Компенсировать полностью все простои участков теоретически возможно лишь при бесконечных емкостях накопителей. Практически же компенсируется лишь часть потерь, это характеризуется коэффициентом межузасткового наложения потерь Δ . При этом исключается компенсация простоев, например, из-за отсутствия заготовок по организационным причинам, остановок оборудования на длительный ремонт и т. п.

Емкость накопителей E должна обеспечить работу автоматической линии при максимально допустимом единовременном простое участка $t_{п. \max}$. Ее можно определить по формуле

$$E = t_{п. \max} Q_{ц.} \quad (279)$$

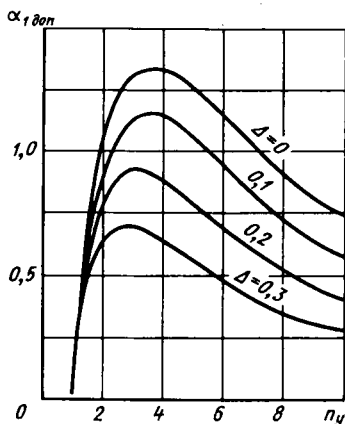


Рис. 374. Зависимость допустимой стоимости накопителей от числа участков при различных коэффициентах межузасткового наложения потерь

Если это условие выполняется, то все простои меньше, чем $t_{n \max}$, будут компенсированы за счет промежуточных заделов. При больших потерях после израсходования заделов линия будет дополнительно простаивать в течение некоторого времени $t_{n \text{ доп}} = t_{n \text{ ф}} - t_{n \max}$, где $t_{n \text{ ф}}$ — фактические потери в линии.

Емкость накопителей зависит прежде всего от надежности работы всех агрегатов автоматической линии, т. е. от величины фактических простоев. Однако при расчете емкости не следует ориентироваться на большие простои неудачно подобранного или плохо освоенного оборудования. Это приведет к значительному увеличению межузастковых заделов и росту затрат на оборудование, что снизит эффективность автоматизации. Сложные конструкции бункеров и магазинов могут также привести к значительным дополнительным простоям автоматических линий.

Надежные в работе бункерные и магазинные устройства позволяют повысить производительность автоматических линий. При нормальной работе многоучастковых автоматических линий с правильно подобранными бункерами и магазинами происходит перераспределение запаса заготовок в соответствии с простоями отдельных участков. При этом линия постоянно

выдает готовую продукцию с заданным ритмом.

Увеличение затрат на автоматизацию при использовании магазинных и бункерных устройств может снизить показатели роста производительности труда. Магазины большой емкости по стоимости в некоторых случаях даже превосходят металлорежущее оборудование, устанавливаемое в автоматические линии. Максимально допустимые затраты на автоматизацию могут быть определены из условия, что введение накопителей обеспечивает повышение производительности труда по сравнению с линией с жесткой связью.

На рис. 372 показана зависимость роста производительности труда λ от числа жестко заблокированных позиций при различных относительных затратах на автоматизацию (α) в соответствии с формулой (276). Увеличение производительности автоматической линии, которое может быть вызвано введением накопителей, повышает значение λ при постоянстве остальных параметров. Однако при дополнительных затратах на автоматизацию это изменение носит различный характер и может привести даже к уменьшению λ .

Рис. 372 подтверждает рост значений $q_{\max}$ при дополнительном увеличении затрат на автоматизацию, что при прочих равных условиях ведет к уменьшению числа участков.

В случае, если число участков в линии задано, из формул (276) и (278) можно определить максимальную стоимость накопителей из условий, что введение n накопителей в линию не дает ни выигрыша, ни проигрыша в производительности труда по сравнению с линией из заблокированных машин. Приняв в формуле (276) $N = 0$, получим допустимую стоимость накопителей из условий гарантированного роста производительности труда при минимальных сроках службы оборудования.

На рис. 374 показана зависимость допустимой относительной стоимости накопителей от числа участков n_y в линии при различной степени компенсации потерь Δ . Наибольшие дополнительные затраты допускаются при малом числе участков, равном 2—3.

§ 1. Автоматизация на базе типового оборудования

Основным оборудованием при этом виде автоматизации являются станки и механизмы, которые выпускают серийно. Их можно использовать как в автоматических линиях, так и при индивидуальном обслуживании. Это большая группа универсальных автоматов и полуавтоматов типа многошпиндельных, револьверных, многорезцовых и других станков, предназначенных для выполнения широкого круга работ. Высокий уровень автоматизации позволяет сравнительно просто объединить это оборудование в поточные линии. Следующим этапом автоматизации является создание автоматических линий.

Особенностью линий из типового оборудования является общность технологий с поточными линиями из этих же станков. Основой разработки технологического процесса служат возможности оборудования, которое достаточно универсально. Некоторое увеличение производительности возможно за счет сокращения холостых ходов и их совмещения. Однако работа заблокированных станков приводит к дополнительным простоям, что снижает производительность.

Опыт эксплуатации подобных автоматических линий показывает, что наибольший рост производительности характерен для линий из шлифовальных и других станков финишной обработки. В этом случае обрабатывают прецизионные заготовки. Кроме того, имеется значительная доля холостых ходов в цикле, которая уменьшается при автоматизации. В линиях для токарной обработки отсутствие оператора часто приводит к неправильной установке заготовки в патроне и механизмах конвейера, несвоевременной уборке стружки, что вызывает дополнительные простои.

Важным преимуществом автоматизации на базе типового оборудования являются значительно меньшие затра-

ты, чем при других видах автоматизации. Стоимость станков остается такой же, как и при их индивидуальном использовании. Во многих случаях применяют оборудование, которое уже длительное время работает на предприятии и затраты на его приобретение окупились. Дополнительные затраты связаны со средствами автоматизации: автооператорами, конвейерами, системой управления. Сокращение числа обслуживающего персонала при минимальных затратах является основным достоинством автоматизации на базе типового оборудования.

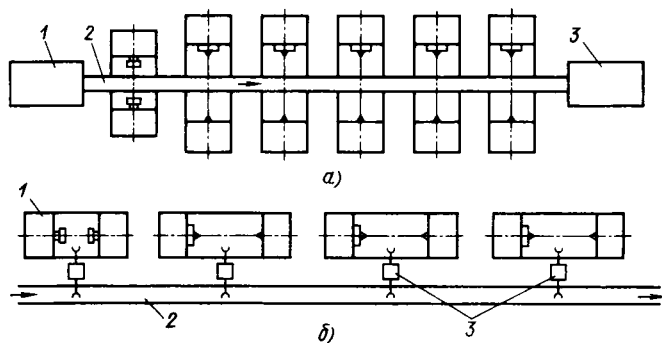
Различают следующие направления при разработке автоматических линий подобного типа: создание линий станкостроительными заводами на базе серийно выпускаемых станков и создание линий самими заводами-потребителями.

Некоторые станкостроительные заводы специализируются на изготовлении автоматических линий на базе многошпиндельных, гидрокопировальных, многорезцовых, зуборезных и других видов автоматов и полуавтоматов. Специализация позволяет использовать прогрессивные методы проектирования и изготовления, нормализованные средства автоматизации, что снижает затраты, сроки проектирования и повышает качество выпускаемых линий.

На рис. 375 показана схема компоновки автоматической линии для обработки валов. Линия может состоять из шести-семи станков, включая фрезерно-центровальный и гидрокопировальные станки. В некоторых случаях возможно применение фрезерных и зубофрезерных станков для фрезерования шпоночных пазов, шлицев и т. д.

Загрузочное устройство 1 цепного типа имеет задел заготовки (рис. 375, а). Шаговый конвейер 2 перемещает детали от одного станка к другому. Призмы конвейера имеют вертикальное перемещение для установки заготовок в рабочие позиции станков и отвода отработанных деталей на конвейер. С последнего станка

Рис. 375. Схемы компоновок автоматических линий для обработки валов



детали отводятся специальным разгрузочным устройством 3. В процессе обработки возможен поворот заготовки для обработки ступеней вала с другой стороны детали. На линии могут быть установлены контрольные устройства. Стружка отводится шнековым конвейером.

На некоторых автоматических линиях (рис. 375, б) для обработки валов используют фронтальное расположение станков 1 с вынесенным конвейером 2. Конвейер расположен на высоте центров станков. Загрузка и выгрузка деталей осуществляются манипуляторами 3. Конструкции линий позволяют обслуживать их наладчиками без постоянного присутствия оператора.

Получило распространение создание автоматических линий заводами-потребителями на базе имеющихся поточных линий. На рис. 376 дана схема автоматической линии для токарной обработки деталей типа колец, типичной в условиях подшипникового производства.

Происходит обработка нескольких типоразмеров колец. Заготовки находятся в магазинах-накопителях 1, откуда подъемником перемещаются на лотковые конвейеры 2, соответствующие каждому типоразмеру. По конвейерам заготовки перемещаются и распределяются с помощью наклонных желобов и подъемников по станкам-дублерам 3. Обработка каждого кольца производится на двух станках. Снятие и установка деталей осуществляются автооператорами. На контрольных автоматах 4 происходит контроль.

При создании автоматических линий из типового оборудования необходимо предварительно проанализировать ожидаемый технико-экономический эффект по сравнению с поточными линиями из таких же станков. В ряде случаев поточные линии вполне конкурентно способны.

При осуществлении автоматизации на базе типового оборудования необходимо предусматривать сокращение затрат на средства автоматизации и повышение надежности встраиваемого в

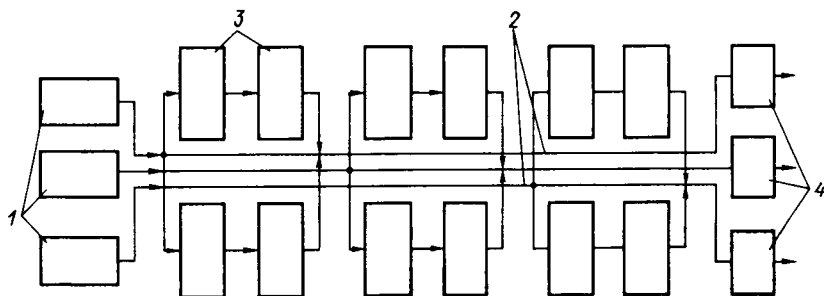


Рис. 376. Схема автоматической линии для токарной обработки деталей типа колец

автоматические линии оборудования. Необходимо создание дешевых типовых универсальных средств автоматизации (автооператоров, конвейеров, командоаппаратов и т. д.). При проектировании станков следует предусматривать возможность их встраивания в линии.

§ 2. Автоматизация на базе агрегатных станков

Автоматические линии из агрегатных станков являются одним из наиболее эффективных вариантов автоматизации.

Важной особенностью линий этого типа является значительный рост производительности по сравнению с линиями на базе типового оборудования. Агрегатные станки — станки специализированные. Их создают в соответствии с требованием технологического процесса для обработки конкретной детали, это позволяет использовать широкие возможности дифференциации и концентрации операций, многопозиционную обработку, обработку детали одновременно с нескольких сторон и т. д. Линии собирают из выпускаемых серийно агрегатов и механизмов, что уменьшает затраты на автоматизацию, значительно сокращает

время на проектирование, изготовление и отладку линий, повышает надежность работы. Автоматические линии из агрегатных станков допускают многократное использование составных элементов, что позволяет вносить изменения в существующие технологические процессы, менять объект производства.

Линии из агрегатных станков предназначены в основном для обработки корпусных деталей, имеющих сложную форму и большое число технологических переходов. Наибольшее распространение получила обработка осевым инструментом (сверление, зенкерование, нарезание резьбы).

Широко применяют фрезерование плоскостей и пазов, используются и другие виды обработки (обточка, протягивание), а также контрольные и сборочные операции.

На рис. 377 даны схема и планировка системы автоматических линий по обработке блока цилиндров. Это последовательно расположенные многопоточные автоматические линии 1Л95, 1Л96, 1Л97, соединенные конвейерными устройствами и накопителями с выполнениями некоторых операций на отдельных агрегатных станках. Автоматизированный комплекс позволяет производить обработку нескольких

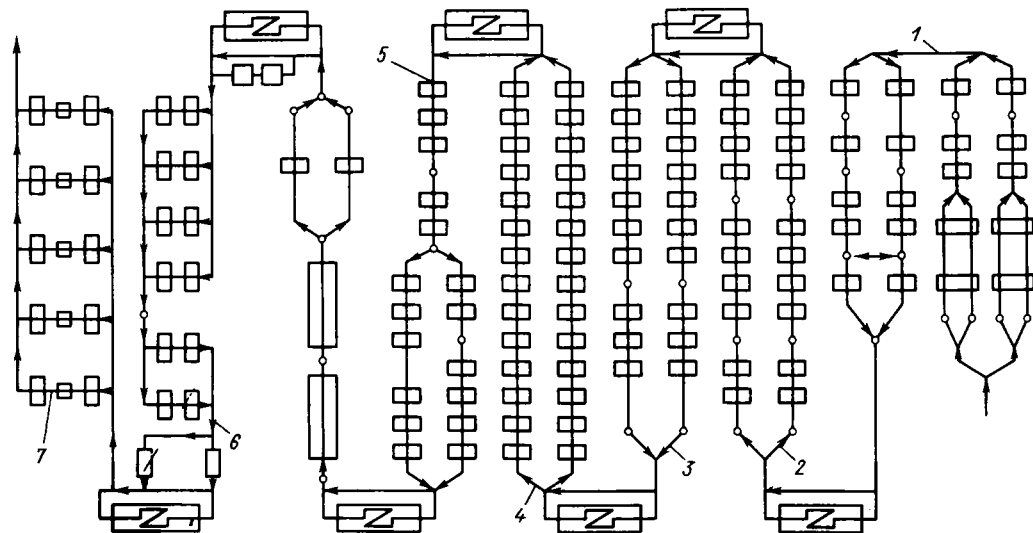


Рис. 377. Схема системы автоматических линий по обработке блока цилиндров двигателя:

1 — автоматическая линия 1Л95; 2 — автоматическая линия 1Л96-а; 3 — автоматическая линия 1Л96-б; 4 — автоматическая линия 1Л96-в; 5 — автоматическая линия 1Л96-г; 6 — автоматическая линия 1Л97-а; 7 — автоматическая линия 1Л97-б

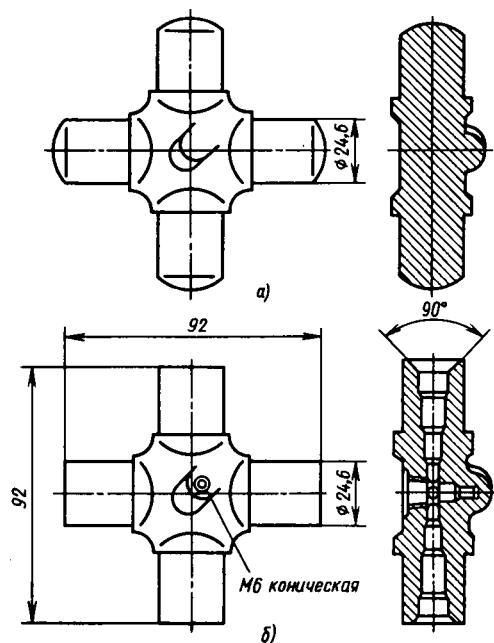


Рис. 378. Заготовка (а) и обработанная деталь (б) — крестовины кардана

модификаций блоков цилиндров. Для этого предусмотрены дополнительные позиции, которые участвуют в работе только при наличии детали соответствующей модификации. Это дает возможность сократить производительные площади и уменьшить количество однотипного оборудования при выпуске блоков цилиндров бензинового и дизельного вариантов двигателей.

Автоматические линии из агрегатных станков создают для обработки, не только корпусных деталей с базовыми поверхностями, позволяющими надеж-

но фиксировать и перемещать их с помощью конвейеров. Большое распространение получили линии для обработки деталей, которые сложно транспортировать и точно фиксировать в рабочей позиции. В таких случаях детали перед началом обработки закрепляются на приспособлениях-спутниках и вместе с ними перемещаются по позициям линии. На каждой рабочей позиции спутник фиксируется и зажимается, обеспечивая требуемую точность относительного положения детали и инструмента. Линии с приспособлениями-спутниками кроме основного конвейера имеет конвейер возврата спутников в загрузочную позицию.

На рис. 378 показан чертеж заготовки и обработанная деталь — крестовина кардана. Для ее обработки на заводе создана автоматическая линия, планировка которой представлена на рис. 379.

На линии осуществляются фрезерование торцов, центровка, сверление канавок для масла, отверстия под клапан и масленку и нарезание резьбы. Сначала производится обработка крестовины с двух сторон, затем деталь проворачивается на 90°, и следует аналогичная обработка двух других сторон. На каждой позиции обрабатываются одновременно три детали, которые закреплены в приспособлении-спутнике и перемещаются вместе с ним.

На линии (рис. 379) использованы электромеханические силовые головки 1—18. Перемещение спутников с обрабатываемыми деталями производится шаговым конвейером. Кантователь 17 предназначен для удаления стружки. Контроль основных параметров обра-

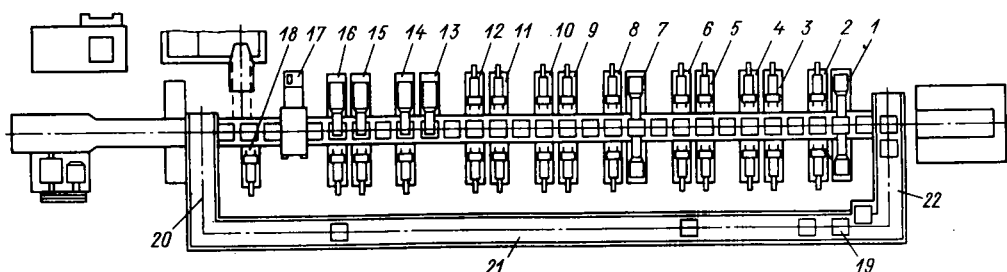


Рис. 379. Планировка автоматической линии для обработки крестовины кардана:

1 — 16 — номера силовых головок; 17 — кантователь для удаления стружки; 18 — контрольная позиция; 19 — позиция загрузки-выгрузки; 20, 22 — поперечные конвейеры; 21 — продольный конвейер

ботанной детали происходит на контрольной позиции 18. Автоматическая линия имеет конвейер удаления стружки, который проходит под главным конвейером. После контроля спутник с деталями сталкивается на поперечные направляющие 20 и попадает на продольный конвейер 21, по которому перемещается в позицию разгрузки-выгрузки 19. На этой позиции с помощью механических ключей освобождаются обработанные детали. Съем обработанных крестовин и установку новых заготовок оператор производит вручную. После закрепления заготовок спутники перемещаются по поперечному конвейеру 22 к первой позиции обработки.

Конструкция продольного и поперечного конвейера позволяет создавать накопление спутников как перед загрузочной позицией, так и перед главным конвейером. Это дает возможность частично компенсировать непродолжительные простои технологического оборудования и временные задержки с загрузкой деталей на спутник.

При обработке крупных деталей, неудобных для перемещения по рабочим позициям, в ряде случаев удобнее использовать сменные силовые головки. На рис. 380 дана схема работы и компоновка линии по обработке корпусных деталей тракторов американской фирмы «Ingersoll». В отличие от широко распространенной последовательности перемещения, при которой деталь движется вдоль установленных силовых головок, фирма предлагает перемещение нескольких головок, последовательно обслуживающих одну рабочую позицию.

Основными направлениями развития автоматизации на базе агрегатных станков являются расширение технологических возможностей линий, использование их не только в массовом, но и серийном производстве, совершенствование структуры для повышения производительности и качества обработки.

Важнейшей задачей является продолжение работ по широкой унификации и стандартизации элементов, из

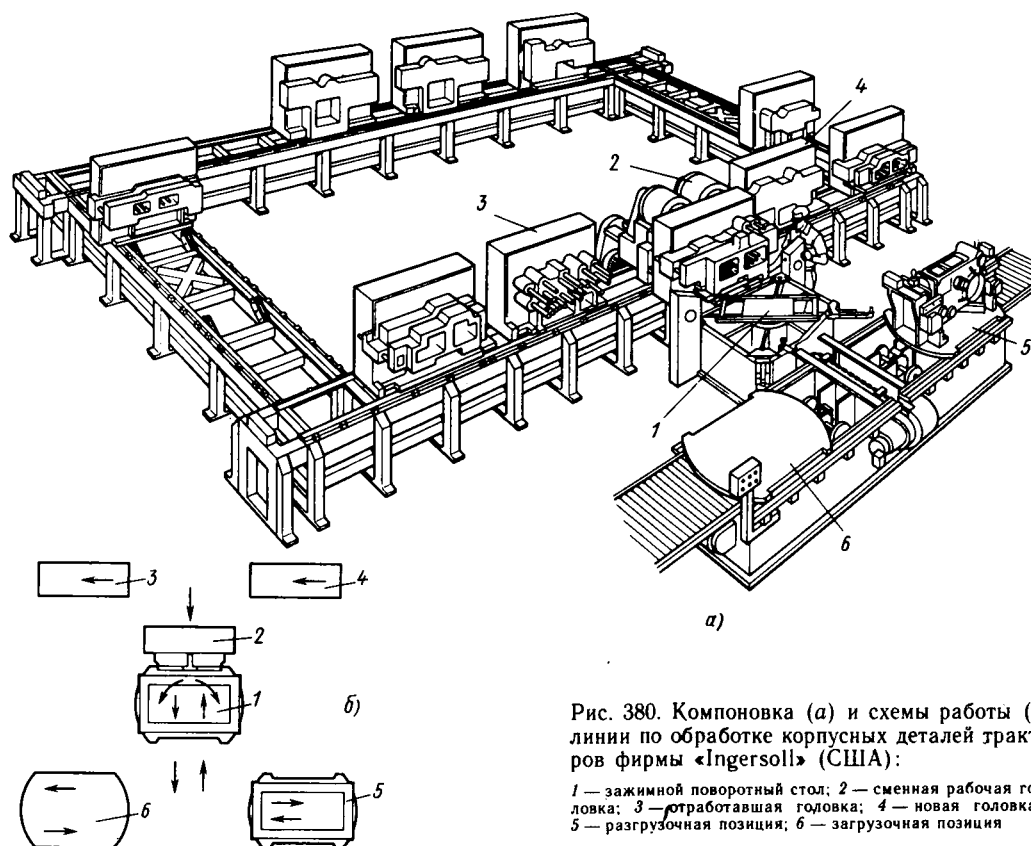


Рис. 380. Компоновка (а) и схемы работы (б) линии по обработке корпусных деталей тракторов фирмы «Ingersoll» (США):

1 — зажимной поворотный стол; 2 — сменная рабочая головка; 3 — отработавшая головка; 4 — новая головка; 5 — разгрузочная позиция; 6 — загрузочная позиция

которых komponуются автоматические линии. Это касается не только основных, базовых механизмов (силовые головки, командоаппараты, конвейеры, поворотные столы, кантователи и т. п.), но и всех остальных агрегатов линий (электрошкафы, инструментальная оснастка, искатели повреждений, системы сигнализации и многие другие).

Повышение производительности осуществляется в основном за счет рациональной дифференциации и концентрации операций, создания более совершенных режущих инструментов, сокращения холостых ходов в цикле, повышения надежности работы.

На автоматических линиях из агрегатных станков широко применяют комбинированные высокопроизводительные инструменты, стандартизация и централизованное изготовление которых является важной задачей повышения технико-экономических показателей автоматизации. Широко применяют принудительную смену инструментов, распределенных по группам в соответствии с их стойкостью. Команду на замену определенной группы инструментов подает специальное устройство системы управления. Сокращение доли холостых ходов достигается, в результате увеличения скоростей перемещения рабочих органов, быстрого действия аппаратуры управления, максимального совмещения холостых ходов между собой и с рабочими ходами.

Высокая надежность работы линии зависит от надежности ее механизмов и агрегатов. Большое число работающих одновременно и зависящих друг от друга машин может привести к резкому увеличению простоев и снижению производительности. Кроме мероприятий по повышению надежности входящих в линию устройств, важным является создание специальных систем сигнализации и отыскания неисправностей, возможных при работе линии.

§ 3. Автоматизация на базе специального оборудования

Для обработки деталей в массовом производстве при стабильной продукции автоматические линии могут быть созданы из специального оборудования. Эти линии в большинстве случаев предназначены для обработки только

одного вида деталей, переналадка связана со значительными затратами, а иногда невозможна. К таким деталям относятся подшипники, метизные изделия, некоторые запасные части массовой продукции машиностроения и т. п.

Преимуществом подобного вида автоматизации является возможность обеспечения высокой производительности, так как технологический процесс и оборудование проектируются специально для выбранной детали. В этих случаях часто удается объединить в единую технологическую цепочку процессы получения заготовки, механическую и термическую обработку, контроль, сборку, а иногда смазку и упаковку готовой продукции.

Наличие специального оборудования приводит к значительным дополнительным затратам, а также увеличивает сроки проектирования, изготовления и отладки автоматических линий. Практика создания и эксплуатации этих линий показала, что экономический эффект может быть обеспечен лишь при условии значительного роста производительности оборудования, что достигается применением новых, прогрессивных технологических процессов и машин.

В Советском Союзе был создан автоматизированный комплекс на базе специального оборудования — автоматический завод по производству поршней грузовых автомобилей. Технологический процесс изготовления поршней включал все операции, начиная от плавки чушек из алюминиевого сплава для получения отливок и кончая упаковкой готовой продукции.

Созданы и эксплуатируются несколько цехов-автоматов по производству подшипников. На рис. 381 дана схема планировки автоматического цеха карданных подшипников. Цех включает четыре технологических потока, состоящих из объединенных в единую цепочку автоматических линий, на которых производится изготовление трех видов карданных подшипников.

Автоматическая система машин охватывает в пределах цеха все основные звенья производственного процесса, характерные для машиностроительного предприятия. Исходным материалом для колец служат прутки. На заготовительном участке методом холод-

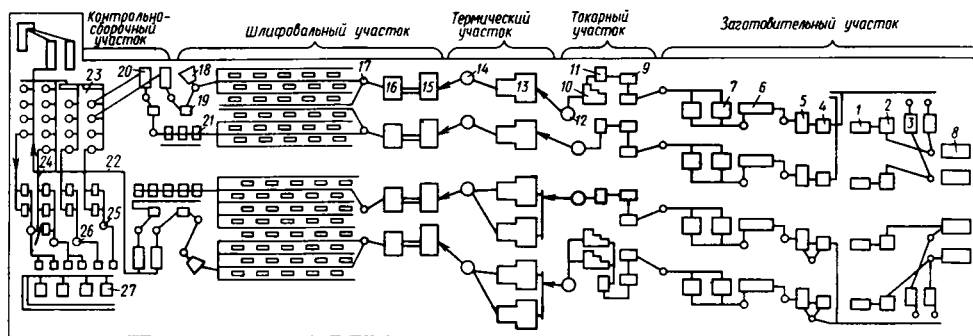


Рис. 381. Планировка автоматического цеха карданных подшипников:

1 — автоматический стеллаж; 2 — пресс рубки заготовок; 3 — автомат омыливания и сушки; 4 — пресс калибровки заготовок; 5 — установка отжига заготовок; 6 — автомат обезжиривания, фосфотирования и сушки; 7 — пресс выдавливания заготовок; 8 — галтовочный автомат; 9 — токарный многшпиндельный автомат; 10 — автомат протягивания паза; 11 — автомат снятия фаски; 12, 14 — магазины-накопители; 13 — термическая печь; 15, 16 — бесцентрово-шлифовальные автоматы; 17 — автоматы шлифовки беговой дорожки и доньшка; 18 — плоскошлифовальный автомат; 19 — контроль; 20 — автомат мойки; 21 — автомат маркировки; 22 — сборочный автомат; 23 — автомат перепроверки колец; 24 — автомат контроля колец; 25 — автомат контроля подшипников; 26 — автомат смазки и упаковки; 27 — автомат упаковки в бандероли

ной штамповки получают заготовку, которая по своей форме близка к готовому изделию. От работы этого участка, выбранной технологии и оборудования во многом зависит успех работы всего автоматизированного комплекса. Использование прогрессивной заготовки позволяет резко сократить оборудование для механической обработки, упростить конвейерную систему, повысить надежность работы всего оборудования.

Заготовка проходит токарную обработку, протягивание паза, шлифование торца, наружного и внутреннего диаметров, а также термическую обработку. Использование магазинов-накопителей и систем станков-дублеров позволяет работать в едином ритме оборудованию различного типа. Готовые кольца контролируются на автоматах и попадают на сборочный участок. После этого происходит окончательный контроль и упаковка готовой продукции.

Высокие технико-экономические показатели цеха-автомата обусловлены тщательно разработанным технологическим процессом на основе последних достижений в этой области. Широко используются бесцентрово-шлифовальные станки, непрерывное протягивание, прогрессивные методы термической обработки, высокопроизводительное оборудование для производства игл.

§ 4. Автоматизация на базе роторных машин

Для производства некоторых видов изделий широко используются автоматические линии на базе роторных и роторно-конвейерных машин.

На рис. 382 показана схема роторно-цепной автоматической линии. В линиях этого типа инструменты расположены по окружности на специальных барабанах (роторах). Заготовки, закрепленные на рабочих позициях, обрабатываются при непрерывном вращении роторов. Детали транспортируются от одной рабочей машины к другой вращающимися транспортными роторами. Таким образом, процесс обработки осуществляется при непрерывном движении как заготовки, так и инструмента.

При необходимости выпуска различных изделий и сравнительно небольшой серийности производства на роторных автоматических линиях могут обрабатываться одновременно ряд однородных по технологии деталей. В этих случаях рабочие роторы оснащают различными инструментами, а транспортные роторы оборудуют для перемещения соответствующих деталей. На рис. 383 дана схема работы участка многономенклатурной автоматической линии из роторных машин.

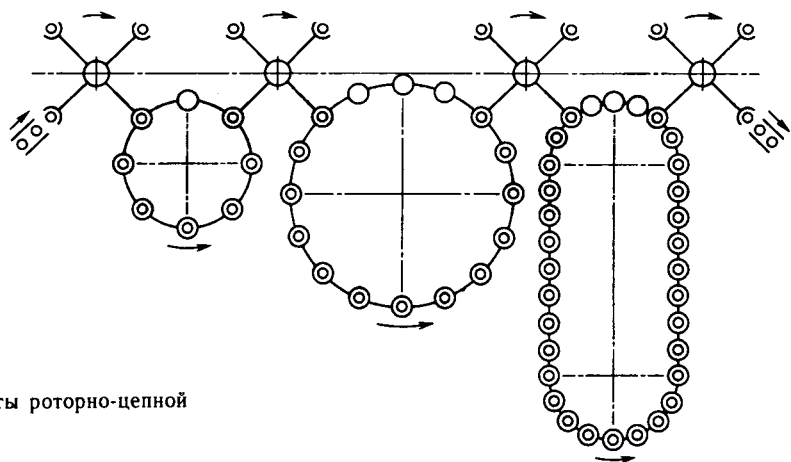


Рис. 382. Схема работы роторно-цепной автоматической линии

Для упрощения конструкции транспортного ротора 1 число исполнительных органов уменьшено до трех при 12 типах обрабатываемых деталей (1—12). Каждый исполнительный орган этого ротора имеет револьверную головку II с четырьмя приспособлениями для снятия, перемещения и закрепления обрабатываемой детали. Поворот револьверной головки происходит за время транспортирования детали от одного рабочего ротора к другому.

Особенностью роторных машин является возможность значительного повышения производительности оборудования для некоторых видов продукции за счет увеличения числа параллельно работающих позиций при сравнительной простоте конструкции. Преи-

муществом роторной линии является то, что при параллельной обработке заготовок в нескольких позициях в роторной машине имеется единственный транспортный механизм-ротор этой машины. Для обычных линий при параллельной обработке необходимо, чтобы число транспортных средств соответствовало числу параллельных потоков.

Изменение в широких пределах числа позиций в каждом роторе позволяет получить одинаковую производительность на всех операциях автоматической линии. Это дает возможность включать в единую технологическую цепочку разнообразные виды обработки, комплексно решать вопросы автоматизации.

Роторные автоматические линии кро-

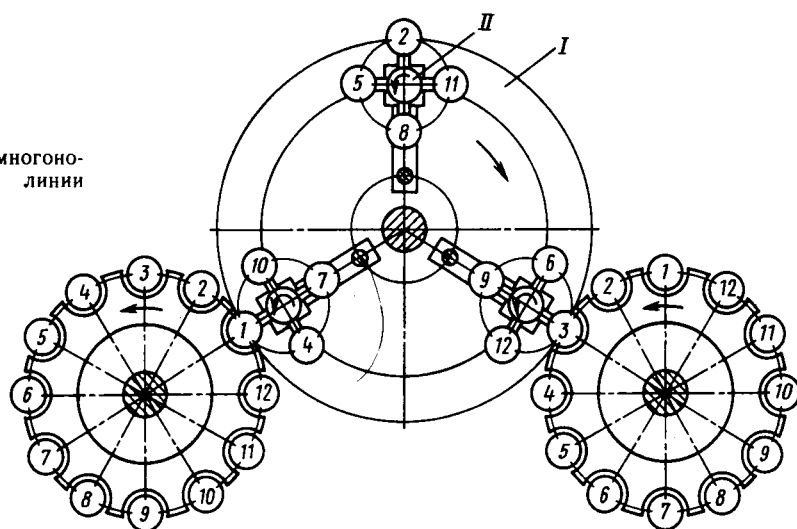


Рис. 383. Схема работы многономенклатурной роторной линии

ме различных рабочих роторов включают также контрольно-измерительные и сборочные роторы, роторы-накопители, запоминающие устройства, механизмы замены инструмента и др. Наиболее успешно на этих линиях осуществляются штамповочные, сборочные и контрольные операции. Из механической обработки получили распространение сверление, токарные и фрезерные работы.

Наличие большого числа инструментов требует особого внимания к разработке конструкций для их крепления и замены. Непрерывное перемещение деталей и высокая производительность роторных машин вызывают необходимость в некоторых случаях создания устройств автоматической замены инструмента без останова роторов. Замена инструментальных блоков может происходить во время холостого хода рабочего ротора по команде специальных устройств, контролирующих состояние инструментов и качество обработки.

Контрольно-измерительные операции могут осуществляться, когда деталь находится в специальных или в транспортных роторах. Включение в автоматическую линию из роторных машин контрольных устройств позволяет без особого увеличения затрат и при сохранении заданной производительности проводить контроль всех обрабатываемых деталей, не увеличивая объем незавершенного производства, находящийся обычно в бункерах и накопителях.

Применение роторных автоматических линий для механической обработки ограничено сравнительно невысокой жесткостью рабочих машин, трудностью отвода стружки, недостаточной для ряда технологических процессов точностью обработки. Важным направлением в совершенствовании создания автоматических станочных систем на базе роторных машин является особо тщательная разработка технологического процесса для необходимого смягчения режимов обработки при требуемой производительности, что возможно осуществить за счет изменения числа рабочих позиций, скорости транспортировки, размеров ротора и т. д. Важной является также оценка целесообразности использова-

ния роторных машин вместо стационарных с учетом всех их особенностей.

§ 5. Автоматизация на базе станков с ЧПУ

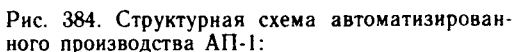
Увеличение выпуска и совершенствование качества металлорежущих станков с ЧПУ позволили использовать их для создания автоматических линий и участков. Большим преимуществом станков с ЧПУ и участков на их основе является высокая производительность при обеспечении мобильности производства, т. е. возможности использования при частой смене объекта производства. Особенно заметна выгода применения станков с ЧПУ при обработке деталей сложной формы, с большим числом точных установочных положений.

Управление группой таких станков осуществляется в большинстве случаев от ЭВМ, функции которых заключаются не только в управлении циклом по заданной программе, но и в подготовке самой программы, сбора сведений и информации, внесения корректив в работу участка. Автоматизация на базе станков с ЧПУ — высший уровень современного производства, позволяющий решать важнейшую проблему массового выпуска продукции с возможностью быстрого перехода на изготовление новых видов изделий без смены оборудования.

При определении экономической эффективности автоматизации следует учитывать значительные затраты на создание станков и средств автоматизации.

Применение автоматических линий и участков из станков с ЧПУ позволяет значительно повысить производительность труда, но оно может оказаться экономически невыгодным при нарушении требуемых соотношений между ростом дополнительных затрат и повышением количества и качества выпускаемой продукции. Основными проблемами в этих условиях являются максимальная загрузка оборудования, уменьшение простоев, улучшение организации труда всех участков производства.

Важным направлением по совершенствованию автоматических систем из станков с ЧПУ является дополни-



1 — устройство ввода; 2 — устройство вывода; 3 — ЭВМ М-6000; 4 — блок сопряжения; 5 — сплеаторссы; 6 — станки; 7 — устройство локального управления складом заготовок и приспособлений; 8 — склад заготовок и приспособлений; 9 — устройство управления складом инструмента; 10 — пульт центрального диспетчера; 11 — инструментальный склад

ЭНИМСом и заводом «Станкоконструкция» создано автоматизированное производство АП-1 для механической обработки корпусных деталей с габаритными размерами $500 \times 500 \times 500$ мм. Номенклатура обрабатываемых деталей 120—180 наименований в год.

АП-1 состоит из шести станков с ЧПУ с автоматической сменой инструмента для выполнения расточных, сверлильных и фрезерных работ, разметочной и контрольно-измерительной машин, автоматизированного склада изделий и заготовок со штабелером, а также отделения подготовки при способлений и инструмента. На рис. 384 дана структурная схема автоматизированного производства АП-1.

На участке предусмотрено приме-

Перемещение обрабатываемых деталей происходит на приспособлениях-спутниках. Спутник с закрепленной заготовкой подается на поворотный стол-робот и затем направляется на обработку. Автоматизированы базирование и закрепление спутника на станке, выполнение операций механической обработки со сменой инструмента и многосторонней обработкой заготовки. Подача заготовок внутри склада программируется ЭВМ и осуществляется штабелером.

Контрольные устройства и предварительная разметка на специальной разметочной машине обеспечивают входной контроль заготовок. Обработанная деталь проверяется по основным параметрам на контрольно-измерительной машине с ЧПУ.

Необходимый инструмент подбирают по комплектам, а затем в магазинах барабанного типа подают на станок и закрепляют на нем. Необходимые приспособления собирают из элементов универсально-сборной оснастки на складе.

Система программного управления от центральной ЭВМ осуществляет подготовку, контроль и хранение управляющих программ, управление работой станков с оперативной корректировкой управляющих программ, диспетчеризацию работы конвейерно-складской системы и оперативное планирование производства.

Для обработки деталей типа тел вращения в ГДР создано несколько типов участков станков с ЧПУ. На рис. 385 показан автоматизированный комплекс «Rota — F — 125NC».

В эту систему входят семь станков с ЧПУ: один токарный, три токарно-револьверных, два вертикально-фрезерных и один круглошлифовальный. Станки расположены вокруг поворотного центрального магазина 1. Вертикальные конвейеры 2 и перемещающееся загрузочное устройство 3 служат для передачи заготовок из централь-

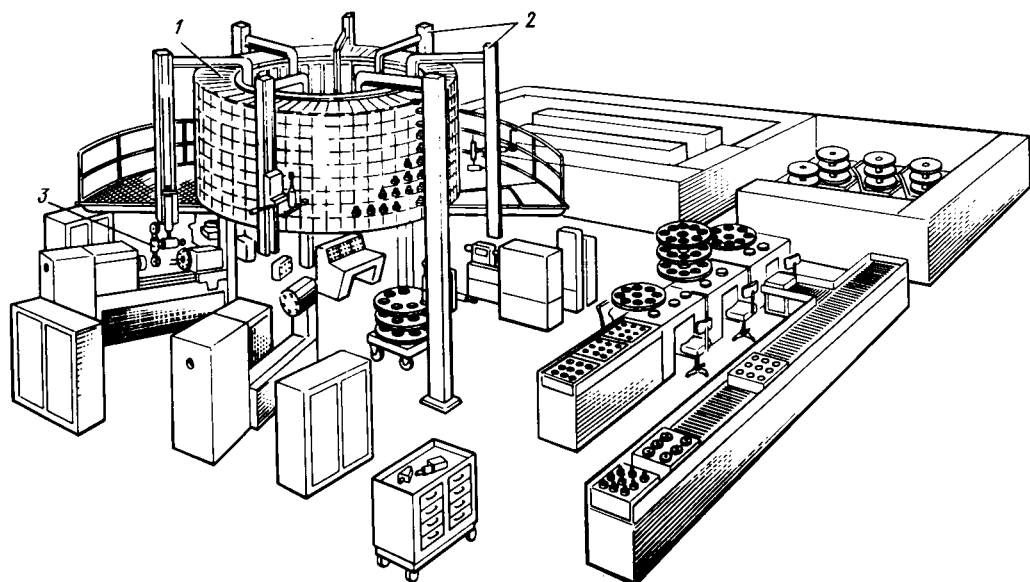


Рис. 385. Автоматизированный комплекс «Rota—F—125NC»

ного магазина к станкам и возврата обработанной детали в магазинное устройство.

Магазин диаметром 5 м состоит из девяти кольцеобразных накопителей, которые могут вращаться независимо друг от друга. Таким образом, каждому из семи станков, а также загрузочной и разгрузочной станциям соответствует одна секция магазина. Емкость магазина 540 заготовок.

Данная система позволяет обрабатывать одновременно несколько серий однотипных деталей. Для обеспечения единой системы зажима на станках и конвейерных устройствах заготовки устанавливаются в прецизионные зажимные патроны. Благодаря применению четырех различных патронов обеспечивается зажим наружных поверхностей диаметром 10—138 мм и внутренних — 28—124 мм. Точность установки деталей в патронах станков может быть доведена до 5 мкм. Обработка ведется изготовленными с требуемой точностью инструментами с их автоматической заменой.

Система программного управления обеспечивает выбор типа и числа станков для обработки серий деталей; одновременную независимую обработку нескольких серий деталей; программирование станков с оптимизацией их работы.

При поступлении сигнала о начале обработки в загруженную секцию магазина от одного из семи станков эта секция получает быстрый поворот, и детали перемещаются к соответствующему станку. Далее заготовка с помощью зажимной цанги автооператора вынимается из центрального магазина и подается на обработку к станку. Заготовка, установленная в первичном патроне, центрируется и зажимается во вторичном зажимном устройстве на шпинделе станка. После обработки готовая деталь с помощью автооператора возвращается в секцию центрального магазина. Участок обслуживает четверо рабочих: двое — для наладки станков и контроля за ними; один — для зажима и разжима заготовок в первичном зажимном устройстве и для обслуживания загрузочных и разгрузочных станций центрального магазина; один занят подбором программ для станков, перфолент и чертежей, а также для подготовки инструмента и контрольных приборов.

Для управления работой системы станков было разработано счетно-решающее устройство MSC (Machine — System — Control). Она постоянно связана с механизмами и станками участка и организует их согласованную совместную работу.

**§ 1. Классификация систем
управления технологическими
комплексами**

Автоматизация производственных процессов предусматривает совместную работу большого числа агрегатов и механизмов, объединенных системой управления. Автоматические линии, участки, цеха и заводы-автоматы представляют собой сложнейшие комплексы, применение которых предназначено для увеличения выпуска продукции, повышения ее качества, сокращения числа обслуживающего персонала и улучшения условий труда, роста эффективности производства и др.

Система управления включает управление работой отдельных агрегатов, обеспечение функционирования по заданной программе автоматических линий, а также управление автоматизированными комплексами, состоящими из нескольких автоматических линий, в виде участков, цехов и заводов. На выбор системы управления влияют применяемый технологический процесс, производственные условия и требования экономики.

Система управления автоматических линий должна обеспечивать кроме управления работой отдельных станков осуществление заданного рабочего цикла линии, взаимную блокировку работающих механизмов и агрегатов, последовательность их работы.

Применение большого числа одновременно работающих механизмов предусматривает специальные устройства для быстрого обнаружения возможных неисправностей и ликвидации их.

Система управления включает систему контроля качества продукции. При применении автоматических линий возможны оптимизация режимов обработки и самонастройка, что придает системам управления функции не

только исполнения имеющейся программы, но программирования.

По способу управления последовательностью работы механизмов и агрегатов различают централизованные, децентрализованные и смешанные системы управления циклом автоматических линий (рис. 386).

При централизованном управлении агрегатами $1 - n$ (рис. 386, а) программа задается центральным командным устройством, которым может быть командоаппарат, распределительный вал, пульт, считывающее устройство с лентопротяжным механизмом и др. Преимуществом такой системы являются возможность точного соблюдения порядка выполнения технологических операций по времени, постоянство продолжительности рабочего цикла, упрощенная подсистема управления работой отдельных агрегатов и простота системы в целом.

Недостатком системы централизованного управления является возможность совершения последующих операций без учета выполнения предыдущих, что может привести к выпуску брака и аварийным поломкам. Для предотвращения этого требуются сложные блокировочные и предохранительные устройства. Эти системы относятся в большинстве случаев к системам группы I (см. рис. 311), т. е. рабочие и холостые хода в них изменяются пропорционально. Это приводит к вынужденному увеличению рабочих и холостых ходов всех агрегатов при наличии отдельных длительных циклов.

Системы централизованного управления применяют в основном в сравнительно простых автоматических линиях с непродолжительным циклом.

В системах децентрализованного управления (рис. 386, б) используют путевые переключатели и упоры. Команды передаются последовательно по мере обработки каждого элемента цикла. До тех пор пока предыдущие

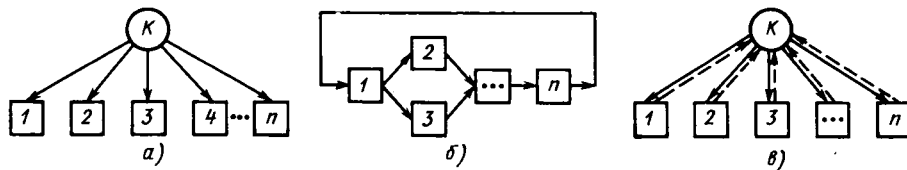


Рис. 386. Схемы вариантов построения систем управления циклом автоматических линий

операции не закончатся, последующие не могут осуществляться. В этом состоит преимущество децентрализованной системы управления.

Основную роль в управлении циклом линии играют автономные подсистемы управления отдельными агрегатами. Наличие данной замкнутой цепи управления может привести к снижению общих показателей надежности и изменению длительности цикла линии, тем более что многие датчики работают непосредственно в зоне обработки и могут дать неправильные сигналы. Эта система управления относится к группе II по принципу совершения холостых ходов (см. рис. 311). Поэтому изменение длительности рабочих ходов отдельных агрегатов не оказывает влияния на время цикла остальных, что выгодно отличает ее от централизованной системы управления.

Системы смешанного управления (рис. 386, в) объединяют в себе многие качества систем централизованного и децентрализованного управления. Циклом линии управляет командоаппарат К, однако при этом осуществляется контроль выполнения промежуточных операций. Вал командоаппарата имеет периодическое вращение в соответствии с получаемыми сигналами.

На рис. 387 дана функциональная схема управления участком автоматической линии обработки картера перемены подач автомобиля, являющейся типичной для линий из агрегатных станков, предназначенных для обработки корпусных деталей.

Командоаппарат I программирует работу основных агрегатов и механизмов: силовых самодействующих голо-

вок II — IV, механизмов зажима и фиксации V и конвейера VI. Отработка полного цикла обработки детали на линии выполняется в следующей последовательности. Командоаппарат выдает электрические команды 1 одновременно на все силовые головки, каждая из которых после подачи сигнала «быстрый подвод» управляется автономно. Выполнив работу, при отходе в исходное положение каждая головка дает сигнал 2. Этот сигнал фиксируется командоаппаратом. После окончания работы головки с самым продолжительным циклом (при условии, что все остальные головки уже отработали) командоаппарат дает команду 3 на расфиксацию и разжим детали, получает сигнал 4 о том, что деталь готова для транспортирования, и включает конвейер (команда 5). После перемещения детали командоаппарат получает сигнал 6 и включает механизм фиксации и зажима (команда 7). Только получив сигнал, что все детали на конвейере зажаты в требуемом положе-

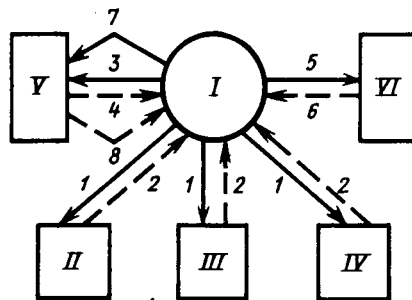


Рис. 387. Функциональная схема управления участком автоматической линии обработки картера перемены передач автомобиля

нии (сигнал 8), командоаппарат дает команду на начало нового цикла, т. е. быстрый подвод силовых головок.

Большая гибкость и универсальность смешанных систем управления позволяют широко использовать их при автоматизации производственных процессов. Недостатком этой системы является наличие дополнительного сложного устройства, каким является командоаппарат, что усложняет автоматическую линию в целом. Кроме этого время работы командоаппарата увеличивает цикл обработки.

Конструкции командоаппаратов предусматривают возможность быстрого отыскания места возникновения неисправностей при работе автоматических линий, иногда для этого используют специальные искатели повреждений с системой сигнализации. Все более широкое применение в системах управления находят ЭВМ. Использование их позволяет решать не только задачи управления циклом и контроля работы автоматических линий, но и вопросы их рациональной эксплуатации, управления качеством и экономической эффективности.

§ 2. Управление качеством

Повышение качества продукции — сложная проблема, зависящая от многих факторов. Важную роль при этом играют качество исходных материалов и комплектующих изделий, состояние производственного оборудования и разработанный технологический процесс, квалификация обслуживающего персонала и дисциплина труда. Качество продукции необходимо рассматривать в тесной связи с экономическими показателями производства.

На рис. 388 показана зависимость затрат T на обеспечение требуемого уровня качества от качественных показателей выпускаемой продукции (i — число бракованных изделий). Создание устройств и специальных служб для предупреждения брака требует дополнительных затрат, которые будут наиболее высокими при повышенных требованиях к качеству выпускаемой продукции (кривая 1). Выпуск продукции более низкого качества связан

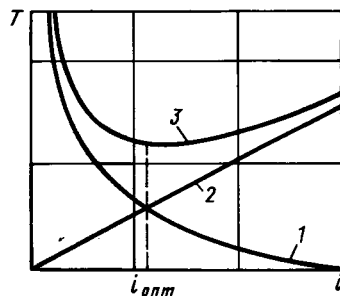


Рис. 388. Зависимость затрат от качественных показателей выпускаемой продукции:

1 — рост затрат при повышении требований к качеству; 2 — увеличение затрат с ростом числа бракованных изделий; 3 — суммарные затраты на выпуск продукции

с увеличением затрат из-за наличия бракованных изделий и дополнительных затрат на обнаружение брака (кривая 2). Высокое качество изделий может быть обеспечено за счет значительного увеличения затрат, что экономически не всегда оправданно. С другой стороны, сокращение затрат на оборудование по предотвращению брака может привести к увеличению затрат из-за наличия изделий, не соответствующих требуемому уровню качества. Кривая 3 на рис. 388 показывает суммарные затраты на выпуск продукции с учетом перечисленных выше категорий затрат. Минимальные затраты могут характеризовать оптимальный уровень качества $i_{\text{опт}}$, выражающийся в данном случае долей дефектных единиц продукции.

Для определения оптимального уровня качества в условиях реального производства необходимо учитывать значительно большее число факторов, которые могут изменяться с течением времени. Оптимизация уровня качества в этих случаях усложняется, однако определение его является необходимым для решения народнохозяйственных задач.

Существуют различные методы оценки качества машин. При дифференцированном методе сопоставляют единичные показатели качества конкурирующих вариантов техники.

Оценка уровня качества заключается в вычислении значений относительных показателей:

$$q_i = \frac{P_i}{P_{i\delta}} \quad \text{или} \quad q_i = \frac{P_{i\delta}}{P_i},$$

где P_i — показатель оцениваемого изделия; P_{i0} — базовый показатель; из двух показателей выбирают тот, увеличение которого соответствует улучшению качества продукции.

Так как единичных показателей качества для любой машины достаточно много (точность, долговечность, количество обслуживающего персонала, стоимость и др.), дифференцированный метод можно использовать для оценки какого-либо отдельного показателя качества. В случае, если этот показатель является основным или по всем параметрам новая техника превосходит имеющуюся, дифференцированный метод оценки можно использовать, как наиболее простой. В остальных случаях необходимо пользоваться комплексными показателями качества.

Обобщенный показатель качества $Q_{об}$ может оценить какое-либо сложное свойство машин, зависящее от ряда других показателей. Например, производительность автоматической линии зависит от выбранного технологического процесса, режимов резания, величины холостых ходов, надежности оборудования и т. д. Обобщенный относительный показатель можно рассчитать по формуле

$$Q_{об} = m_1 q_1 + m_2 q_2 + \dots + m_n q_n = \sum_{i=1}^n m_i q_i,$$

или в случае большого разброса значений

$$Q_{об} = q_1^{m_1} q_2^{m_2} \dots q_n^{m_n} = \prod_{i=1}^n q_i^{m_i},$$

где q_i — безразмерные относительные показатели по отдельным параметрам, влияющим на обобщенный показатель качества; m_i — коэффициенты весовости, определяющие относительную важность каждого составляющего элемента (сумма этих коэффициентов должна быть равна единице); n — число учитывающих показателей.

Интегральный комплексный показатель $P_{ин}$ характеризует экономическую эффективность техники и определяется отношением:

$$P_{ин} = \frac{W'}{T'},$$

где W' — количество произведенной машиной продукции за весь срок ее

эксплуатации; T' — суммарные затраты на создание машины и ее эксплуатацию за этот период.

В некоторых случаях для оценки техники используют обратную величину, представляющую собой отношение суммарных затрат к количеству произведенной продукции.

Интегральный показатель наиболее полно характеризует качество машины. Основные положения по оценке прогрессивности новой техники, выбора структуры автоматических линий и другие вопросы, изложенные в предыдущих разделах, базируются на подобном подходе к оценке техники.

На рис. 389 дана схема оценки уровня качества, разработанная Всесоюзным научно-исследовательским институтом стандартизации (ВНИИС) [56]. В соответствии с этим могут быть выбраны различные показатели качества, определенные с требуемой точностью, а также значения базовых показателей.

Базовыми можно считать показатели существующей или предполагаемой продукции, которые характеризуют высший или средний достигнутые уровни качества, экономически оптимальный или перспективный уровни качества.

Аттестация продукции является одним из мероприятий по управлению качеством. Изделия машиностроения распределены по трем категориям качества: высшей, первой и второй.

Важную роль в осуществлении управления качеством играет стандартизация. Партией и правительством поставлена задача по повышению роли стандартов в ускорении научно-технического прогресса и улучшения качества готовой продукции, сырья, материалов и комплектующих изделий и увеличению ответственности хозяйственных органов, предприятий и объединений за их соблюдение.

Государственная система стандартизации (ГСС) базируется на принципах плановости, оптимальности, динамизма и комплексности. Это означает, что стандарты разрабатывают на основе планового развития народного хозяйства, отдельных отраслей и предприятий при оптимальном установлении технико-экономических требований к качеству изделий с периодическим обновлением стандартов и технических ус-

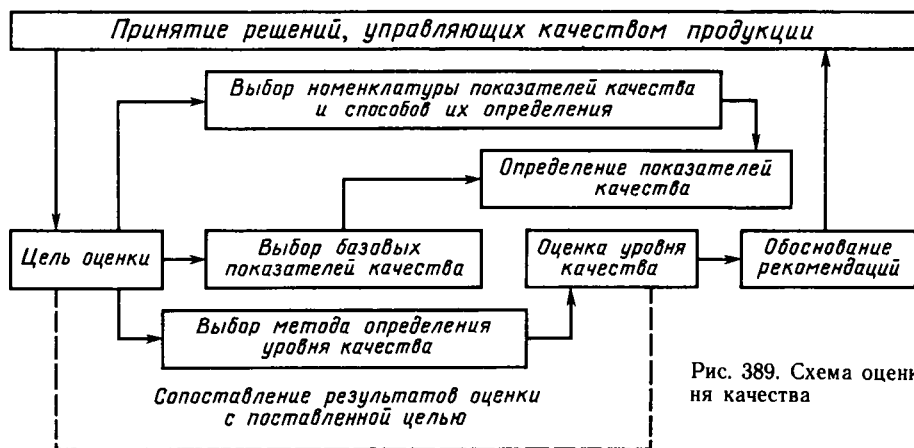


Рис. 389. Схема оценки уровня качества

ловий в соответствии с изменяющимися возможностями и потребностями народного хозяйства.

Комплексная стандартизация предусматривает разработку стандартов по определению требований к качеству продукции и материально-техническому обеспечению производства, а также формам организации труда. Важными являются работы по унификации машин и оборудования для повышения экономичности производства и его мобильности. Широкое распространение получила заводская стандартизация, которая позволяет на базе ГСС осуществлять управление производством в условиях конкретного предприятия на всех этапах изготовления изделий.

Особенностью управления качеством является его осуществление на всех уровнях. Межотраслевая, отраслевая и заводская системы управления качеством обеспечивают требуемый уровень качества на всех стадиях создания продукции, включая исследовательскую и конструкторскую разработку, выбор технологического процесса и оборудования, организацию и управление производством, создание системы контроля и испытаний, организацию эксплуатации и др.

На рис. 390 представлена модель комплексной системы управления качеством продукции на базе стандартизации.

На горизонтальной оси обозначены четыре стадии «жизненного цикла» машины: 1) исследование и проектирование; 2) изготовление; 3) обращение

и реализация; 4) потребление и эксплуатация. Стадия обращения и реализации имеет особое значение в случаях, когда на этом этапе выпускаемые товары могут терять качество, например товары широкого потребления. На вертикальной оси даны уровни управления. Для межотраслевого уровня управления характерно внедрение государственных стандартов, организационно-методических разработок, среди которых «Единая система технологической подготовки производства» (ЕСТПП), «Единая система конструкторской документации» (ЕСКД) и др. Отраслевой уровень управления качеством включает и отраслевые стандарты (ОСТ), методики планирования повышения качества в отраслях. Управление качеством на уровне объединения (предприятия) осуществляется государственными и отраслевыми стандартами наряду со стандартами предприятий, которые учитывают специфику производства, регламентируют работу и взаимоотношения различных служб.

На третьей оси показаны функции управления, которые включают перечисленные на рис. 390 разделы.

Представленная трехмерная модель комплексной системы управления состоит из 168 элементов, каждый из которых должен быть обеспечен соответствующей нормативно-технической и методической документацией в виде государственных и отраслевых стандартов, методических указаний, а также стандартов предприятий.

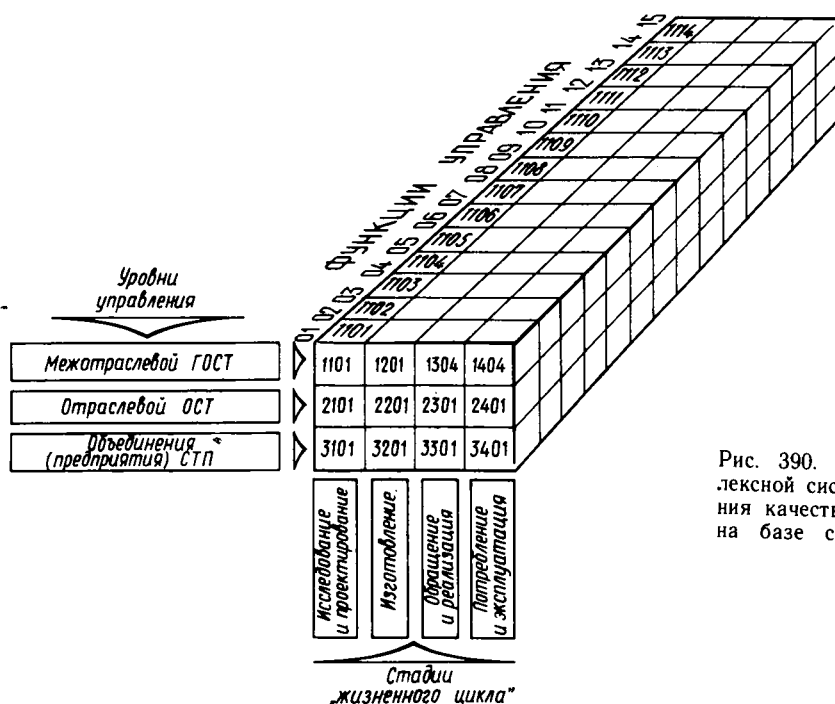


Рис. 390. Модель комплексной системы управления качеством продукции на базе стандартизации

Системы управления качеством не могут пока полностью охватить все элементы модели из-за отсутствия соответствующих стандартов и методических указаний для всех уровней управления на различных стадиях изготовления продукции. Важной задачей является разработка и внедрение государственной и отраслевой документации для полного обеспечения функционирования комплексной системы управления качеством.

Необходимость решения многообразных задач при управлении предусматривает использование ЭВМ [23]. Основной задачей на всех стадиях производства является достижение оптимальных показателей качества. Создание систем управления требует формализации процессов управления с помощью методов экономико-математического моделирования, которое заключается в определении вида зависимостей выбранного критерия управления от влияющих на него факторов.

На рис. 391 дана принципиальная схема управления качеством с использованием ЭВМ на машиностроительном предприятии. В работе участвуют объекты управления: конструкторские (I) и технологические (II) отделы,

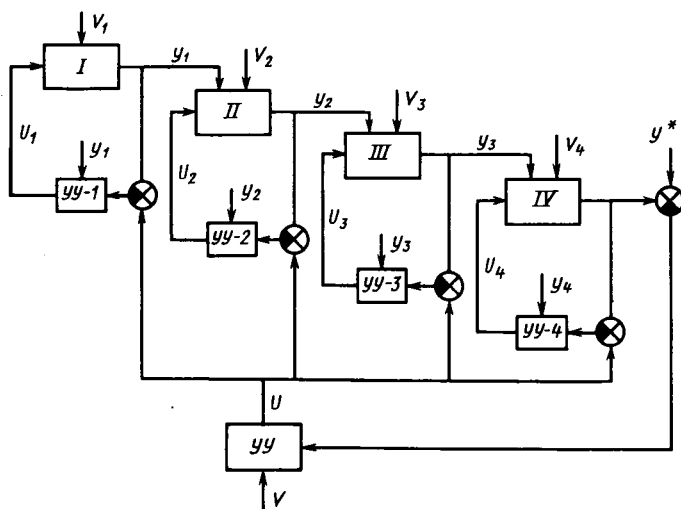
служба организационно-материального обеспечения (III), производственные цехи и участки (IV).

Каждое из этих подразделений имеет устройство управления (УУ) с необходимой вычислительной техникой, которое воздействует на объект управления O . Характер воздействия зависит от степени расхождения основного y и заданного y^* показателей функционирования с учетом ряда дополнительных показателей $\bar{y}$, которые не должны выходить за пределы ограничений (например, себестоимости, долговечности, объема производства и др.). На объекты управления воздействует вектор неуправляемых входов V (качество заготовок и комплектующих изделий, отказы оборудования и т. д.). Цифровые индексы соответствуют различным объектам управления. На входы объекта в общем случае накладываются определенные ограничения.

Полное описание объекта управления задается как формула: $\bar{y} = f(O, V)$, при ограничениях $\bar{y} \in Y$, $O \in U$, $V \in V$.

Вся работа координируется системой управления предприятия, которая связывает воедино системы управления отдельных подразделений.

Рис. 391. Принципиальная схема управления качеством с использованием ЭВМ на машиностроительном предприятии



Заводские системы управления качеством имеют свои особенности [56]. Так, система НОРМ (научная организация работ по увеличению моторесурса) Ярославского моторного завода основное внимание концентрирует на улучшении технических характеристик выпускаемых двигателей, их надежности, срока службы. На заводе эти задачи совместно решают

конструкторы, эксплуатационники, представители предприятий-смежников.

Горьковская система КАНАРСПИ (качество, надежность, ресурс с первых изделий) решает те же вопросы в условиях серийного производства, когда имеет место частая смена объекта производства.

Систему отличает широкое использование комплексных техно-

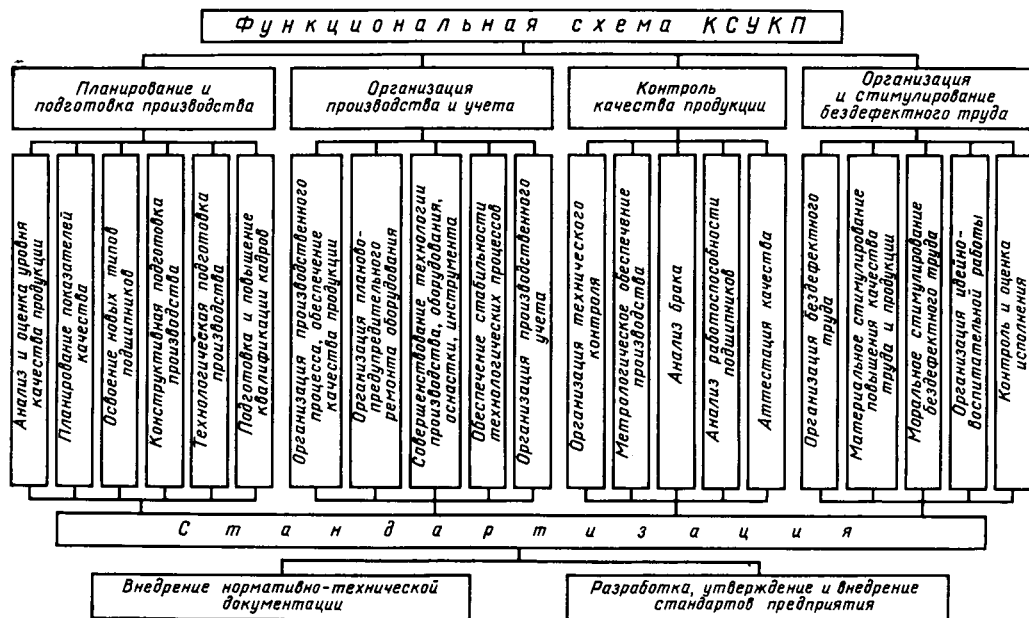


Рис. 392. Функциональная схема КСУКП

логических процессов, основанных на механизации и автоматизации.

В основе ряда систем лежит управление качеством труда рабочих ИТР и служащих. Саратовская система бездефектного изготовления продукции (БИП) предусматривает постоянное внимание к качеству продукции, сдаче ее с первого предъявления, неуклонному соблюдению технологической дисциплины, ответственности сотрудников за выполняемую работу. Дальнейшим развитием этой системы управления качеством явилась система бездефектного труда (СБТ), которая распространяется не только на производство, но и на тех, кто готовит его в конструкторских и технологических бюро, в других отделах предприятий.

Львовская система объединила в себе основные положения уже рассмотренных систем, доведя их до уровня заводских стандартов на стадиях разработки, производства и эксплуатации.

Многие московские предприятия осуществляют управление качеством, сочетая мероприятия технического, экономического, организационного и воспитательного характера. Широко используют стандартизацию и унификацию изделий, вводят прогрессивные методы контроля и испытаний, создают комплексные планы инженерно-технических мероприятий по совершенствованию производства.

На рис. 392 представлена функциональная схема комплексной системы управления качеством продукции (КСУКП). КСУКП является подсистемой автоматизированной системы управления производством (АСУП) и направлена на обеспечение необходимого уровня качества продукции при ее разработке, изготовлении, обращении и эксплуатации для достижения максимальной эффективности производства. Основой системы управления являются стандарты предприятия, государственная и отраслевая нормативно-техническая документация при наличии системы бездефектного труда всех категорий работающих. Структура КСУКП изображена на рис. 393.

Достижение поставленных задач осуществляется планированием показателей качества продукции, поддержанием требуемого уровня качества

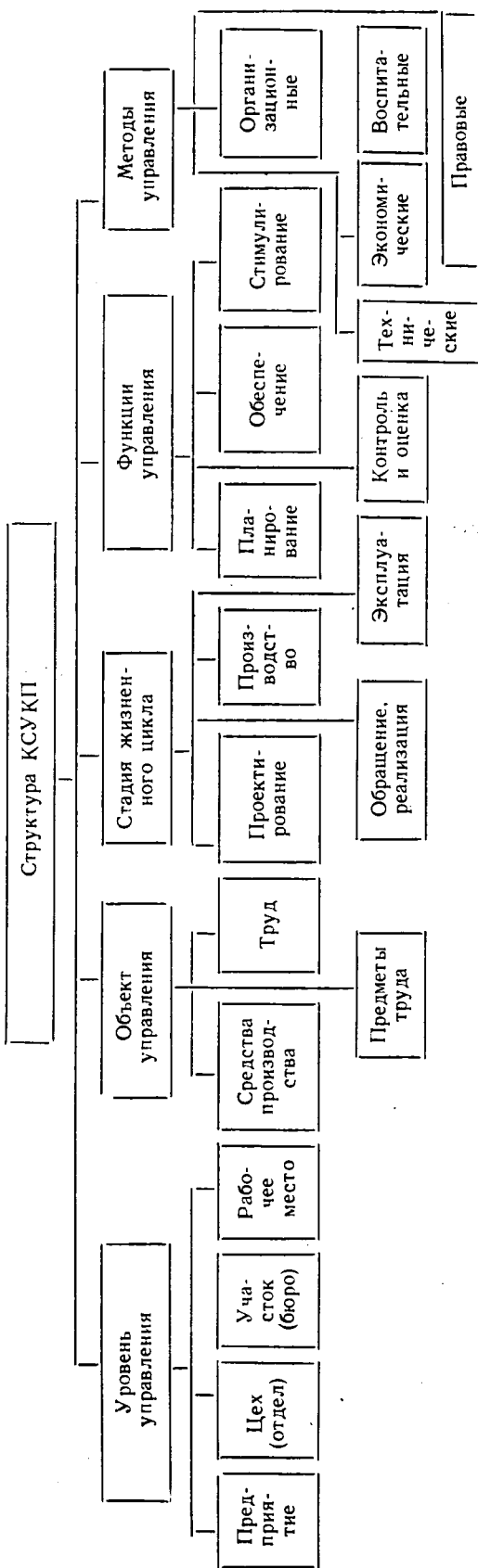


Рис. 393. Структура КСУКП

в процессе производства, хранением и транспортированием изделий при постоянном совершенствовании эксплуатационных характеристик. Важным фактором является повышение качества труда исполнителей. Все, связанное с управлением качеством, рассматривают комплексно, во взаимосвязи с собственным опытом завода и опытом других предприятий.

§ 3. Автоматизированные системы управления технологическими процессами

Автоматизация производственных процессов характеризуется широким использованием вычислительной техники (ЭВМ) не только для сбора и обработки информации, но и для непосредственного управления технологическими машинами и системами машин. При этом процесс автоматизации управления оборудованием органически сочетается с автоматизацией организации всего производственного процесса, обеспечивая его эффективность. Такие системы управления получили название автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Важнейшим преимуществом АСУ ТП перед традиционными системами управления на механической, пневмо-гидравлической, электрической основе является возможность гибкого управления с оперативным реагированием на отклонение параметров процесса для обеспечения функционирования автоматизированного оборудования с экстремальными показателями качества процесса и изделия.

АСУ ТП — это система, реализующая на базе высокоэффективной вычислительной и управляющей техники, обеспечивающая управление технологическим объектом на основе централизованно-обработанной информации по заданным технологическим и технико-экономическим критериям, определяющим количественные и качественные результаты выработки продукта, и подготавливающая информацию для решения организационно-экономических задач.

Совокупность автоматизированного высокопроизводительного оборудования и эффективных средств управления на базе ЭВМ получили название автоматизированных технологических комплексов (АТК). Таким образом, АСУ ТП является высшей степенью автоматизации управления технологическим оборудованием и одновременно низовым информационным звеном промышленных АСУ. На рис. 394 дана общая классификация автоматизированных систем управления.

В условиях машиностроения, особенно при серийном и массовом быстром производстве, АСУ ТП как подкласс АСУ производственно-технологического класса (рис. 394) весьма тесно смыкается с АСУ проектно-конструкторского класса и прежде всего с АСУ технологической подготовки производства (АС ТПП), которые призваны осуществлять автоматизированную подготовку управляющих программ для АСУ ТП, а также расчет и проектирование объектов, изготавливаемых на АТК:

Существует несколько иерархических уровней управления промышленным машиностроительным предприятием, которые в совокупности осуществляют автоматизированные функции управления организационно-экономической и производственной деятельностью предприятия на основе применения экономико-математических методов ЭВМ.

Верхним уровнем управления является комплексная система АСУП, реализованная в масштабе предприятия и его основных подразделений (подсистем). Средним уровнем являются одна или несколько автоматизированных систем управления производственными процессами (АСУ ПП), входящих в качестве подсистем в комплексную АСУП и осуществляющих функции прямого оперативного управления производством.

Низовым уровнем являются отдельные АСУ ТП, которые входят в состав подсистем в АСУ ПП или непосредственно в АСУП.

В автоматических системах управления технологическими процессами в зависимости от степени охвата технологических объектов и выполняемых функций также можно выделить иерархические уровни [29].

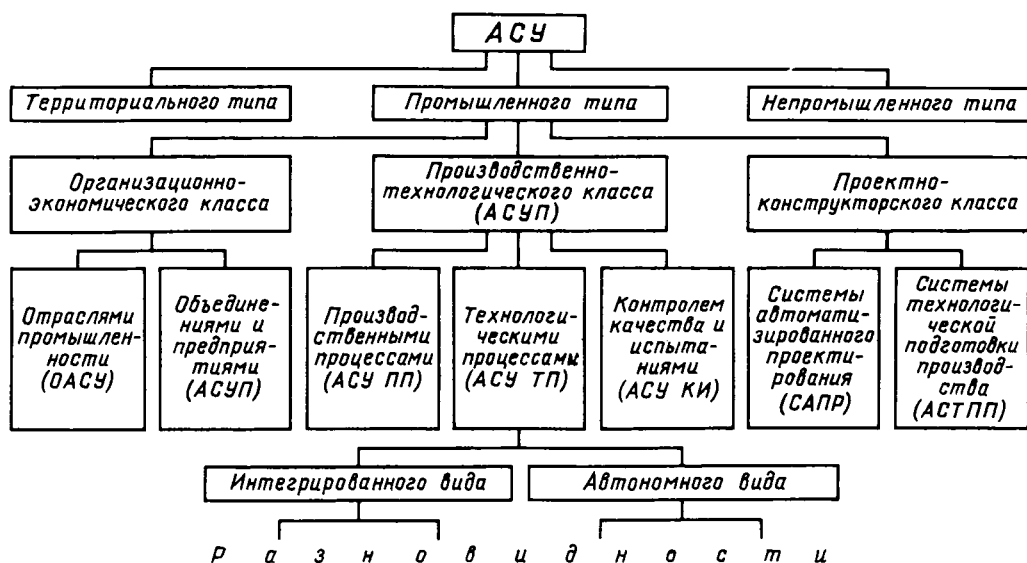


Рис. 394. Общая классификация автоматизированных систем управления

В простейшем случае это системы управления группой однотипных машин (или одной машиной) без оптимизации, когда функции системы управления сводятся к осуществлению заданий программы с использованием прямого числового управления по жесткой или полужесткой программе. Второй уровень предусматривает управление несколькими операциями, отдельными технологическими процессами. Это обычная группа оборудования, объединяемая в автоматические линии. Выполняемые функции: изменение режима и хода технологических операций, выработка рекомендаций и корректировка с целью обеспечения требуемого уровня качества обрабатываемых из-

делий. Таким образом, решается ряд задач по оптимизации процесса производства. Третий уровень включает систему комплексного управления производством отдельных изделий с охватом комплексно-технологических операций обработки, контроля, сборки. Выполняемые функции: изменение хода процесса в целом, его расчет и реализация, оперативное управление ходом производственного процесса на уровне участков и цехов. Именно на этом уровне осуществляется взаимосвязь АСУП и АСУ ТП.

При взаимодействии с вышестоящими уровнями АСУ ТП получает от них сигналы о номенклатуре выпускаемых изделий, их количестве и сроках

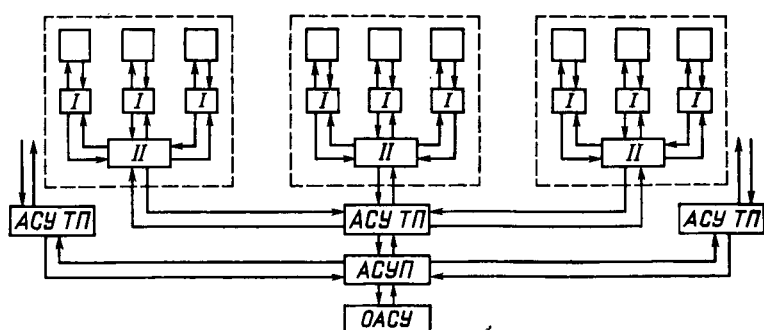


Рис. 395. Вариант построения автоматизированной системы управления

выпуска, технико-экономических показателей выполнения производственных заданий.

В вышестоящие уровни АСУ ТП выдает обобщенные фактические данные о ходе технологических процессов, количественных и качественных показателей выпущенных изделий, состоянии технологического оборудования, потреблении инструмента, электроэнергии, вспомогательных материалов, технологической себестоимости и др.

На рис. 395 показан возможный вариант построения автоматизированной системы управления. Группой станков управляет программное устройство (I), которое входит как подсистема в систему управления второго уровня (II). Вместе они составляют автоматическую линию или небольшой автоматизированный участок с возможностью оптимального управления технологическим процессом. Управление технологического комплекса цеха представляют собой третий уровень АСУ ТП, при котором осуществляется учет технологической и организационно-производственной информации с последующим корректированием работы на всех уровнях.

Автоматизированная система управления производством включает в себя АСУ ТП, являясь, в свою очередь, составной частью отраслевой автоматизированной системы управления (ОАСУ). В зависимости от характера взаимосвязи АСУП и АСУ ТП различают автономные и интегрированные системы управления.

При реализации автономных АСУ ТП обмен информацией с вышестоящими уровнями (системами) производится с помощью специальных систематизированных документов, передаваемых оператором, использующим различные технические средства (телефонную, телеграфную связь и т. д.).

В интегрированных АСУ ТП обмен информацией на всех уровнях производится автоматически с помощью специальных устройств ввода и вывода информации, передаваемых ЭВМ, которые являются основными функциональными органами управления для всех подсистем.

На рис. 396 дана классификация основных структурных вариантов комплекса технических средств (КТС)

АСУ ТП. В зависимости от особенностей управляемого технологического оборудования КТС может иметь прямое или не прямое взаимодействие. При прямом взаимодействии управляющий вычислительный комплекс (УВК) непосредственно осуществляет управление технологическим оборудованием. При не прямом взаимодействии управление может осуществляться либо оператором, когда система управления работает в режиме «советчика», либо через локальные средства регулирования и управления (система разомкнутого управления), когда оборудование управляется по упорам, с помощью копиров или каким-либо другим подобным способом. КТС прямого воздействия в зависимости от состава УВК подразделяется на системы прямого цифрового управления и прямого аналогоцифрового управления.

Функции технолога-оператора, который является необходимым элементом АСУ ТП, могут быть различны. При разомкнутой системе управления он осуществляет все функции управления исполнительными устройствами или устройствами локальной автоматики, пользуясь информацией о состоянии объекта и рекомендациями рационального управления. Вывод оперативной информации и рекомендаций производится либо автоматически, либо по запросу оператора. В остальных случаях он осуществляет контроль за работой системы, задает ей режимы работы и производит необходимую корректировку.

Основными техническими средствами при формировании комплекса технических средств АСУ ТП являются: а) устройства получения информации о режиме технологического процесса (датчики сигналов физических величин, устройства ручного ввода сигналов и др.); б) устройства формирования сигналов и обслуживания каналов передачи информации (преобразователи вида, формы, уровня сигналов, коммутаторы сигналов и др.); в) устройства локальной автоматики (регуляторы, командоаппараты, интерполяторы, усилители-преобразователи командных сигналов, исполнительные устройства и др.); г) средства вычислительной техники (устройства переработки информации в виде цифровых

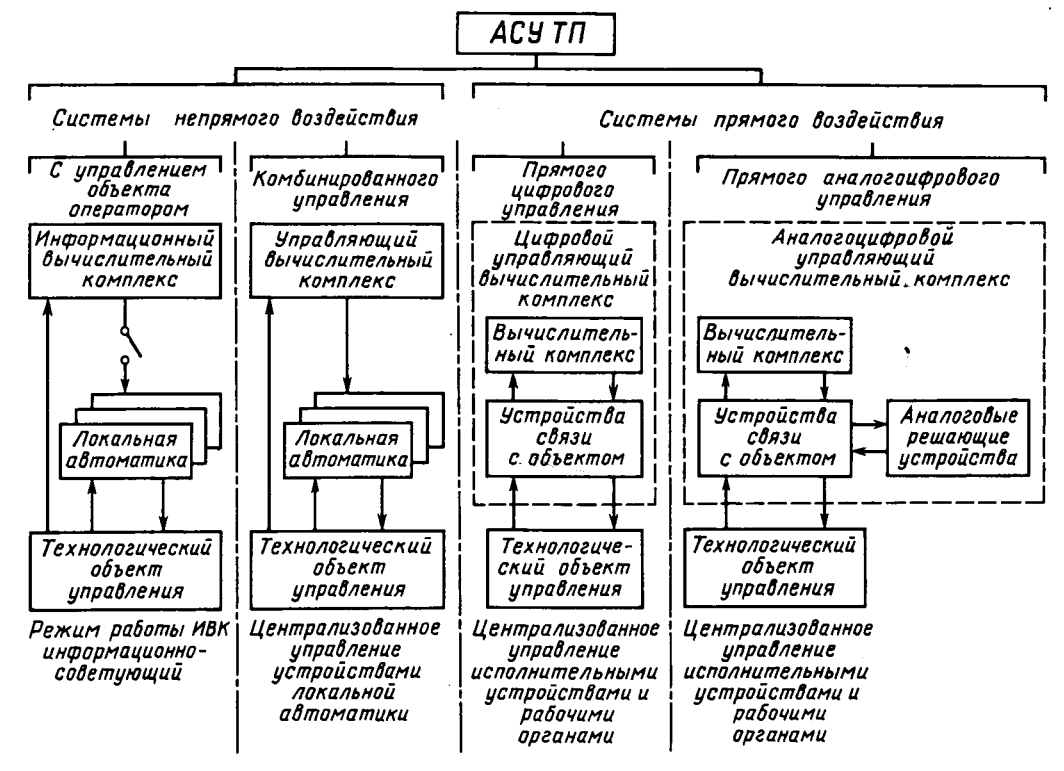


Рис. 396. Классификация основных структурных вариантов реализации АСУ ТП

и вычислительных машин, специализированные счетные решающие устройства, устройства ввода и вывода программ и информации, запоминающие устройства, устройства передачи данных и др.); д) устройства связи с объектом (преобразователи сигналов контроля и управления, коммутаторы сигналов, адаптеры различного назна-

чения, телемеханические устройства и др.); е) устройства связи с оперативным персоналом (индикаторы, сигнализаторы, регистраторы, пульты управления и др.).

Созданы разработки по внедрению АСУ ТП. Они реализуются прежде всего применительно к участкам из станков с ЧПУ. Разработан автоматиз-

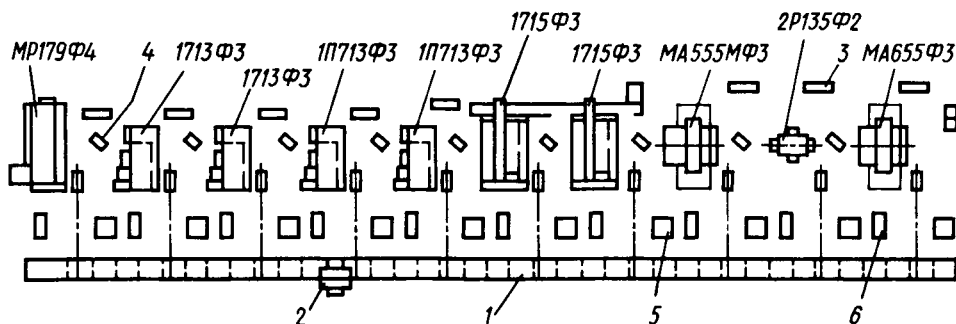


Рис. 397. Схема автоматизированного участка АУ-1:

1 — транспортеры-накопители; 2 — электроштабелер; 3 — система инструментального обеспечения; 4 — пульты программного управления станков; 5 — пульты связи с диспетчером; 6 — электрошкафы управления

зированный участок АУ-1 для обработки с централизованным управлением от ЭВМ деталей типа тел вращения (рис. 397). Участок включает следующее оборудование: 1) станки с ЧПУ, которые позволяют осуществлять полную обработку тел вращения, включая обточку наружных, внутренних и торцевых поверхностей, сверление, развертывание, нарезание резьбы и др.; всего участок имеет десять станков, в том числе фрезерно-центровальный, токарные (центровые и патронные), вертикально-фрезерные и вертикально-сверлильный; 2) транспортно-накопительную систему, которая обеспечивает подачу заготовок и полуфабрикатов к станкам и их удаление после обработки; 3) систему группового программного управления, включающую упрощенные индивидуальные пульта управления; 4) управляющий вычислительный центр на базе ЭВМ типа «Минск-32» и «Днепр-3», которые осуществляют управление работой станков, диспетчирование и учет выпущенной продукции; 5) систему обеспечения инструментом, которая выполняет функции хранения запаса и оперативной подачи необходимых инструментов к станкам.

В этом участке отсутствуют интегрированные схемы на уровне цеха или завода.

Внедрение АСУ ТП связано со значительными дополнительными затратами. Целесообразность использования этой системы необходимо строго обосновывать технико-экономическими расчетами. Назначение проектных расчетов заключается прежде всего в выборе оптимальных вариантов из числа технически возможных с обоснованием требований, которые ставятся перед разрабатываемыми проектами АСУ ТП для обеспечения заданных показателей экономической эффективности.

Экономическая эффективность внедрения АСУ ТП почти полностью определяется тем, насколько улучшаются технические характеристики оборудования при его оснащении этой системой, главными из которых являются рост производительности и улучшение качества выпускаемой продукции. Важным показателем является также сокращение затрат на обслуживание технологического комплекса.

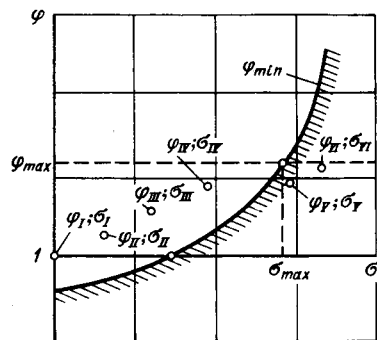


Рис. 398. Диаграмма сравнения вариантов реализации АСУ ТП и требований к производительности

Количественно вариантность может быть выражена через безразмерные коэффициенты: φ — рост производительности оборудования по сравнению с базовым вариантом; σ — изменение стоимости (капитальных затрат); ϵ — изменение затрат при сокращении числа обслуживающего персонала. Важнейшим из них являются φ и σ , так как внедрение АСУ ТП для оборудования типа станков с ЧПУ, которые уже находятся на высоком уровне автоматизации, незначительно снижает число работающих. Поэтому каждый реально возможный вариант «технологический процесс — АСУ ТП» на рис. 398 реализуется в виде точки (I—VI). При этом $\sigma > 1$. Величины φ_i и σ_i обычно взаимосвязаны и зависят во многом от степени интеграции системы управления: чем обширнее ее функции, тем она дороже и должна обеспечивать более высокую производительность.

Дополнительные затраты на автоматизацию могут окупаться за счет повышения производительности оборудования и сокращения затрат при уменьшении количества обслуживающего персонала. И если при небольших затратах окупаемость может быть обеспечена только за счет сокращения числа работающих, то при более высоких затратах необходим и дополнительный выпуск продукции. Таким образом, минимальное, критическое повышение производительности есть функция затрат на автоматизацию: $\varphi_{\min} = f(\sigma)$. Рассчитанная по уравне-

нию эффективности кривая $\varphi_{\min}$ делит все поле технически возможных вариантов на две области: 1) $\varphi_i > \varphi_{\min}$ — рост производительности оборудования выше критического значения, необходимого для окупаемости капиталовложений, и варианты экономически эффективны; 2) $\varphi_i < \varphi_{\min}$ — рост производительности меньше критического, что недостаточно для окупаемости капиталовложений на автоматизацию, и варианты экономически неэффективны.

Величина σ' (см. рис. 398) определяет наибольшую величину капиталовложений, при которых еще можно иметь эффективные варианты при

отсутствии роста производительности оборудования. Величина $\sigma_{\max}$ определяет абсолютно максимальные затраты на автоматизацию, поскольку при $\sigma > \sigma_{\max}$ для окупаемости капиталовложений необходим рост производительности выше возможного для данного оборудования.

Для оценки и выбора вариантов построения автоматизированных технологических комплексов необходимо иметь математические зависимости $\varphi_{\min} = f(\sigma)$ на основе теории производительности, знать возможный и требуемый уровни повышения производительности и другие технико-экономические показатели производства.

Глава 45 Выбор оптимальных вариантов построения автоматических станочных систем

§ 1. Техничко-экономические показатели эффективности автоматизации

Выбор варианта автоматизированного производства зависит от многих параметров. Важнейшим показателем является экономический эффект, достигаемый в результате внедрения новой техники. Целесообразность внедрения того или иного варианта оценивают по экономическим критериям сопоставлением величины ожидаемых затрат и экономии в результате внедрения. Методики оценки экономической эффективности основаны на расчете не абсолютной, а относительной эффективности при сравнении двух вариантов техники, один из которых принимают за исходный, а второй сравнивают с ним.

Распространенным критерием оценки новой техники является срок окупаемости дополнительных капиталовложений, который определяют по формуле

$$n = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2}, \quad (280)$$

где K_1, K_2 — капиталовложения по двум вариантам производства; C_1, C_2 — себестоимость выпуска продукции за год по двум вариантам производства.

Величина, обратная сроку окупаемости, т. е. коэффициент эффектив-

ности дополнительных капиталовложений,

$$E = \frac{1}{n} = \frac{C_1 - C_2}{K_2 - K_1}. \quad (281)$$

Полученные значения n и E сравнивают с нормативными показателями, что дает возможность выбрать из имеющихся вариантов лучший.

Показателем сравнительной экономической эффективности является также минимум приведенных затрат. Приведенные затраты по i -му варианту

$$3_{pi} = C_i + E_n K_i, \quad (282)$$

где C_i — годовые текущие затраты по i -му варианту; K_i — капиталовложения по i -му варианту; E_n — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

При использовании этого критерия оценки экономической эффективности из конкурирующих вариантов выбирают тот, у которого величина C_{pi} будет минимальной.

Возможна оценка вариантов новой техники по критерию удельных капиталовложений, когда наилучшим вариантом является тот, который требует минимальных капиталовложений на создание одинаковых производственных мощностей. Существуют и другие критерии, отражающие определенную сторону экономической эффективности

техники. В большинстве случаев выбранный по какому-либо критерию наиболее эффективный вариант не является лучшим при оценке техники по другим критериям.

В соответствии с методикой определения экономической эффективности использования новой техники расчет годового экономического эффекта от производства и использования новых средств труда долговременного применения (машины, оборудование, приборы и т. д.) с улучшенными качественными характеристиками (производительность, долговечность, издержки эксплуатации и т. д.) производят по формуле

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & \left[3_1 \frac{B_2}{B_1} \frac{P_2 + E_n}{P_1 + E_n} + \frac{(H_1^1 - H_2^1) - E_n(K_2^1 - K_1^1)}{P_2 + E_n} - \right. \\ & \left. - 3_2 \right] A_2, \end{aligned} \quad (283)$$

где 3_1 , 3_2 — приведенные затраты единицы соответственно базового и нового средств труда, определяемые по формуле; $\frac{B_2}{B_1}$ — коэффициент учета роста производительности единицы нового средства труда по сравнению с базовым; B_1 , B_2 — годовые объемы продукции (работы), производимые при использовании единицы соответственно базового и нового средства труда, в натуральных единицах; $\frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}$ — коэффициент учета изменения

срока службы нового средства труда по сравнению с базовым; P_1 , P_2 — доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) соответственно базового и нового средства труда, их рассчитывают как величины, обратные срокам службы средств труда, определяемым с учетом их морального износа; E_n — нормативный коэффициент эффективности; $\frac{(H_1^1 - H_2^1) - E_n(K_2^1 - K_1^1)}{P_2 + E_n}$ — экономия по-

требителя на текущих издержках эксплуатации в отчислениях от сопутствующих капитальных вложений за весь срок службы нового средства труда по сравнению с базовым; K_1^1 , K_2^1 — соответствующие капитальные вложения

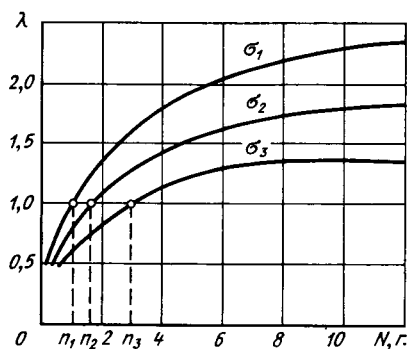


Рис. 399. Зависимость роста производительности труда λ от сроков службы N при различных значениях единовременных затрат

(капитальные вложения без учета стоимости рассматриваемых средств труда) при использовании соответственно базового и нового средств труда в расчете на объем продукции (работы), производимой с помощью нового средства труда; H_1^1 , H_2^1 — годовые эксплуатационные издержки при использовании соответственно базового и нового средств труда в расчете на объем продукции (работы), производимой с помощью нового средства труда, в этих издержках учитывают только часть амортизации, предназначенной на капитальный ремонт средств труда, т. е. без учета средств на их реновацию, а также амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям, A_2 — годовой объем производства новых средств труда в расчетном году.

Сравнительная оценка возможных вариантов автоматизации может быть дана на основе обобщающего критерия, которым является рост производительности труда.

При выборе наиболее выгодного варианта из двух возможных рост производительности можно определить по формуле (254). На рис. 399 показаны зависимости роста производительности труда для трех вариантов техники при различных коэффициентах увеличения стоимости σ , что приводит во всех случаях к росту производительности машин на 20% ($\varphi=1,2$) при постоянстве остальных параметров и одновременном вводе оборудования в действие ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$).

При $\lambda=1$ ($N=n$) производитель-

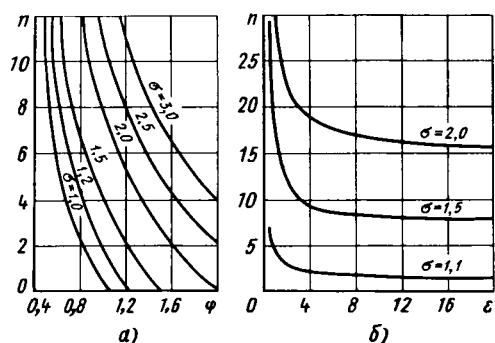


Рис. 400. Зависимость сроков окупаемости от роста производительности оборудования (а) и сокращения затрат живого труда (б)

ность труда новых вариантов становится равной производительности варианта, с которым происходит сравнение, т. е. экономия от применения новой техники покрывает первоначальные расходы (на рис. 399 соответственно значения n_1 , n_2 и n_3).

Величина n представляет собой срок окупаемости дополнительных капиталовложений, являющийся одним из критериев экономической эффективности новой техники. Значение n для каждого варианта можно найти из формулы (254) после подстановки в нее $N = n \lambda = 1$ (при $L = 0$):

$$1 = \varphi \varepsilon \frac{K + n(m + 1)}{K \sigma \varepsilon + n(m \delta \varphi \varepsilon + 1)}.$$

Решив это уравнение относительно n , получим

$$n = \frac{K(\sigma - \varphi)}{m \varphi (1 - \delta) + \varphi - \frac{1}{\varepsilon}}. \quad (284)$$

В этом случае экономический критерий оценки техники выражен непосредственно через технико-экономические показатели машин. Это облегчает понимание приводимых расчетов, позволяет определять влияние основных показателей на эффективность новой техники.

Таковыми показателями являются рост производительности оборудования, его стоимость, сокращение затрат на обслуживание. На рис. 400 показаны зависимости сроков окупаемости от роста производительности оборудования φ и сокращения затрат живого труда ε .

Графики показывают возможности сокращения сроков окупаемости на раз-

личных этапах автоматизации. Наибольшее влияние на сроки окупаемости оказывает рост производительности машин φ , который всегда вызывает значительное сокращение сроков окупаемости техники даже при ее удорожании. Сокращение числа обслуживаемого персонала оказывает заметное влияние лишь при малых значениях ε . В случаях же, когда увеличение ε связано со значительным ростом затрат, необходимо особенно тщательно анализировать целесообразность такой автоматизации для обеспечения требуемых сроков окупаемости. На рис. 400, б показано, например, что для случая $\sigma = 1,5$ обеспечить сроки окупаемости менее 7—10 лет невозможно даже при значениях ε , равных 10—20 годам. Значительное влияние на сроки окупаемости оказывает величина текущих расходов на сырье, инструмент, электроэнергию.

разно рассматривать только для случаев, когда рост производительности машин φ меньше изменения стоимости σ . При $\varphi > \sigma$ новая техника является заведомо эффективной и дает выигрыш не только за счет увеличения количества выпускаемой продукции, но и за счет сокращения капиталовложений.

Полученные значения сроков окупаемости для нового варианта техники не должны превышать нормативные, соответствующие данному типу оборудования. Однако оценка только по срокам окупаемости не может в полной мере характеризовать прогрессивность новой техники, т. е. в этом случае не определены количественные показатели роста производительности труда. Эти показатели должны соответствовать плановым значениям роста производительности труда.

Таким образом, из конкурирующих вариантов лучшими будут те, которые, обеспечив заданную программу выпуска и требуемое качество изделий, будут иметь минимальные сроки окупаемости при выполнении заданий по росту производительности труда.

§ 2. Выбор оптимальных вариантов построения систем машин

В гл. 31 были рассмотрены особенности проектно-конструкторских задач при создании автоматов и автоматических линий. Из большого числа

возможных вариантов автоматизации необходимо выбрать оптимальные.

Для выбора и обоснования структурно-компоновочных решений на проектных стадиях необходимы расчеты длительности обработки; несовмещенных холостых ходов, внецикловых потерь; ожидаемой производительности оборудования; капитальных затрат по элементам и системе в целом; фонда зарплаты; себестоимости обработки; показателей экономической эффективности и т. д.

Если число возможных вариантов невелико, задача решается методом полного перебора, а именно — для каждого из вариантов рассчитывают все показатели, после чего выбирают оптимальный вариант по минимальным срокам окупаемости, максимальному коэффициенту эффективности капиталовложений, минимальным приведенным затратам или иным принятым показателям эффективности. При числе вариантов, достигающем сотен или тысяч, метод полного перебора становится нецелесообразным, потому что выполнение сотен и тысяч идентичных расчетов (что возможно с применением ЭВМ) затрудняет конструктору понимание физических основ сравнительного анализа, таит возможность грубых ошибок. Поэтому обязательным условием процесса оптимизации является использование принципа неполного перебора и именно нахождение оптимального варианта сокращенным путем, не прибегая к расчету всех возможных технических решений. На этом основаны все известные математические методы оптимизации: линейное и динамическое программирование, случайный и направленный поиск и др.

Проведение процесса оптимизации предусматривает рассмотрение следующих категорий возможных вариантов технических решений:

1) технически возможные варианты, которые реализуемы в данных условиях с учетом достижения науки и техники в отрасли; число таких вариантов при автоматизации производства весьма велико (см. гл. 31);

2) технически целесообразные варианты, которые выделяют из общей совокупности после исследований и расчетов параметров: производительности, быстродействия, надежности в работе и т. д.;

3) экономически целесообразные варианты, которые не только реализуемы и могут обеспечить ощутимый технический эффект, но способны дать ожидаемый экономический эффект в нормативных пределах по сравнению с некоторым исходным уровнем, например действующим производством;

4) рациональные варианты, которые среди экономически эффективных обладают наилучшими показателями, достаточно близкими друг к другу;

5) оптимальный вариант, который признается в качестве наилучшего и является основой всего дальнейшего процесса проектирования (эскизный, технический проекты, разработка рабочей документации).

Любым расчетам, необходимым для оптимизации, должен предшествовать сбор и систематизация исходных данных по режимам обработки, длительности холостых ходов, ожидаемым показателям надежности (потерям по оборудованию и инструменту t_e и ΣC_i , коэффициенту возрастания простоев W); стоимости станков и элементов транспортных систем, зарплате основных и вспомогательных рабочих и т. д.

Пример. Время рабочих ходов цикла взято из табл. 19; время холостых ходов цикла $t_{х.х} = 0,2$ мин, внецикловые потери одного комплекта инструмента $\Sigma C_i = 0,10$ мин/шт; потери механизмов одной рабочей позиции $t_e = 0,02$ мин/шт; коэффициент загрузки линии $\eta_{загр} = 0,9$. Коэффициент возрастания внецикловых потерь является функцией емкости накопителей и числа участков:

n_y	1	2	3	4	5	6
W	1,00	1,10	1,15	1,18	1,20	1,22

Простейшим вариантом любой автоматической линии является однопоточная ($p=1$), без станков-дублеров ($m=0$), с минимальным числом позиций ($q=q_{\min}$) и жесткой межагрегатной связью ($n_y=1$), если ее производительность Q_1 равна или больше требуемой ($Q_1 \geq Q_{тр}$), никакой процесс оптимизации не нужен, так как именно такая линия и будет наилучшим вариантом. Однако в большинстве случаев $Q_{тр} > Q_1$; например, для обработки вала по рис. 246 расчеты по формуле (209) дают следующую величину ожидаемой производительности (шт/мин):

$$Q_{а.л} = \frac{p}{t_p(q) + t_{х.х} + \frac{\Sigma C_i + q t_e}{n_y}} \eta_{загр.}$$

где p — число потоков обработки независимых линий ($p=1$); $t_p(q)$ — время рабочих ходов цикла как время обработки на лимитирующей позиции — согласно табл. 20 при $q=4$ $t_p(4) = 0,99$ мин.

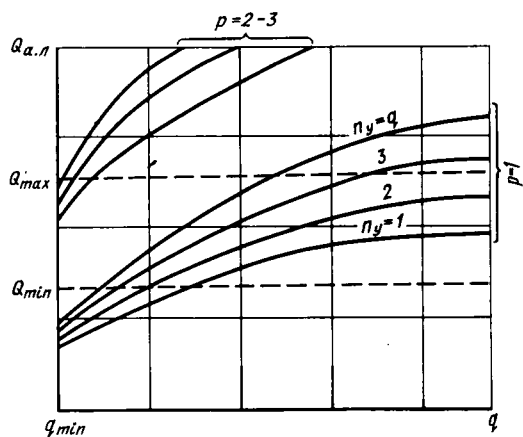


Рис. 401. Зависимость производительности автоматической линии от числа позиций при различных значениях чисел участков и параллельных потоков

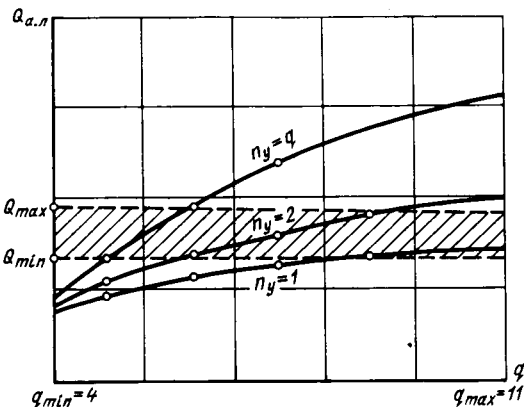


Рис. 402. Результаты расчетов при определении структуры автоматической линии

Повышение производительности до требуемого уровня можно достигнуть: 1) увеличением числа позиций $q > q_{min}$, т. е. дополнительной дифференциацией технологического процесса; 2) введением станков-дублеров на лимитирующих операциях ($m > 0$); 3) делением линии на участки ($n_y > 1$); 4) добавлением параллельно работающих линий ($p > 1$); 5) комбинированными способами.

Эти пути можно иллюстрировать диаграммой рис. 401, где показана зависимость производительности $Q_{a.l.} = f(q, n_y, p)$ для случая с равномерной дифференциацией технологического процесса.

Шаговый отбор и выбор оптимального варианта производят по двум основным этапам: 1) отбор по техническим критериям, выделение технически целесообразных вариантов, соответствующих требованиям производительности $Q_{min} < Q_{a.l.} < Q_{max}$ на рис. 402 в заштрихованной зоне); 2) отбор

по экономическим критериям, выделение экономически целесообразных вариантов, вплоть до оптимального.

Следует отметить, что и отбор по производительности носит по существу экономический характер. В самом деле, все варианты с $Q_{a.l.} < Q_{min}$ не являются конкурентными, так как не обеспечивают заданную программу выпуска. Для обеспечения конкурентности необходимо создавать линии с несколькими потоками. Варианты с $Q_{a.l.} > Q_{max}$, как правило, также будут экономически неэффективными, так как они всегда дороже, а реальная производительность не может быть выше требуемой. Следовательно, создание линий с более высокой номинальной производительностью приведет лишь к росту простоев из-за отсутствия заготовок, но не к увеличению выпуска.

Рассчитаем ожидаемую производительность технически возможных вариантов автоматической

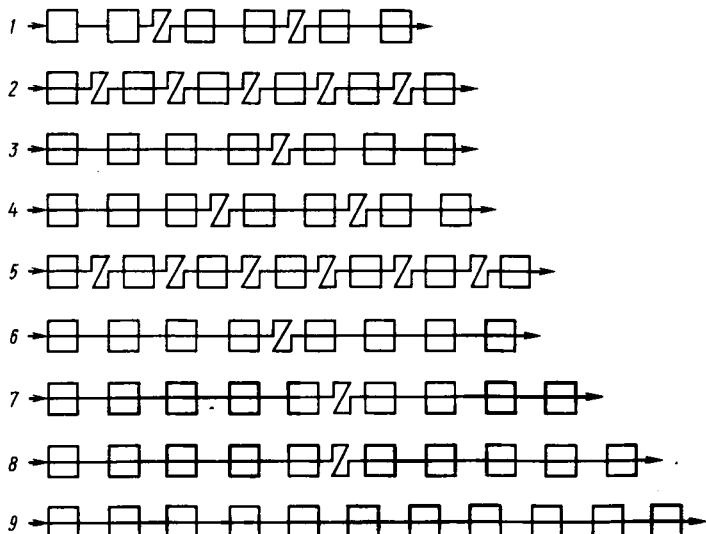


Рис. 403. Структурные схемы конкурирующих вариантов автоматической линии

Таблица 25

Результаты расчетов $Q_{a.л}$ для однопоточных линий

q	$t_p(q)$, мин	$Q_{a.л}$, шт/смену при n_y						q
		1	2	3	4	5	6	
4	0,99	320	340	—	354	—	—	354
5	0,94	322	345	—	—	—	—	363
6	0,54	450	496	526	—	—	540	540
7	0,52	450	502	540	—	—	—	568
8	0,45	474	540	—	591	—	—	626
9	0,42	480	560	591	617	—	—	654
10	0,40	480	561	600	—	635	—	675
11	0,30	526	635	685	720	—	757	800

линии для обработки ступенчатых валов, пользуясь формулой (209) и подставляя значения параметров, характеризующих работу автоматической линии.

Результаты расчетов для однопоточных линий ($p=1$) без станков-дублеров ($m=0$) сведены в табл. 25.

По данным табл. 25 построен график, представленный на рис. 402. Из рассмотренных вариантов однопоточных линий, которые являются технически возможными и инженерно разумными, для дальнейшего рассмотрения целесообразно оставить лишь следующие:

q	6	6	7	7	7	8	9	10	11
n_y	3	6	2	3	7	2	2	2	1
$Q_{a.л}$	526	540	502	540	568	540	560	561	526

Структурные схемы девяти конкурирующих вариантов автоматической линии приведены на рис. 403.

Каждый из представленных девяти вариантов может быть использован для создания автоматической линии. Определенную роль в выборе варианта могут сыграть особенности технологи-

Таблица 26

Результаты расчета λ и n для различных структурных вариантов при $\varepsilon=4$, $\delta=1$

q	n_y	Q	K	m	Φ	σ	λ	n
6	3	526	10,00	1,00	1,00	1,00	1,00	—
6	6	540	12,4	1,03	1,03	1,24	0,94	2,04
7	2	502	10,4	0,95	0,95	1,04	0,95	0,94
7	3	540	11,2	1,03	1,03	1,12	0,98	0,87
7	7	568	14,4	1,08	1,08	1,44	0,92	3,33
8	2	540	11,6	1,03	1,03	1,16	0,97	1,26
9	2	560	12,9	1,06	1,06	1,29	1,29	2,17
10	2	561	14,1	1,07	1,07	1,41	0,92	3,18

ческого процесса, конструктивные соображения, возможность установки в цехе и т. д. Основным критерием оценки должен быть обеспечиваемый рост производительности общественного труда, сроки окупаемости новой техники.

Для определения экономической эффективности используем методику, изложенную в гл. 41 и 45. Примем, что стоимость фрезерно-центрального станка равна 14 000 р., гидрокопировального станка 8000 р., стоимость накопителя 3500 р., стоимость транспортной системы в зависимости от числа участков n_y и станков в линии q равна $(2000n_y + 500q)$ р. Затраты на текущий ремонт, инструмент и электроэнергию 7500 р./год. Годовой фонд зарплаты обслуживающего персонала при одном наладчике и одном операторе при двухсменной работе 6960 р. Результаты расчета λ и n приведены в табл. 26.

Лучшие экономические показатели имеет вариант 1. Наиболее близок к нему вариант 4. Таким образом, трехучастковые линии для нашего технологического процесса и выбранного оборудования являются экономически более выгодными. Возможно построение линии с двумя участками (варианты 3 и 6), экономический эффект от внедрения которых будет близок к эффекту трехучастковых линий по вариантам 1 и 4.

Список литературы

1. Ачеркан Н. С. Металлорежущие станки. М.: Машиностроение, 1965. с.
2. Белянин А. Н. Промышленные роботы. М.: Машиностроение, 1975, 298 с.
3. Бобров А. Н., Перченко Ю. Г. Автоматизированные фрезерные станки для объемной обработки. — Л.: Машиностроение, 1979, 231 с.
4. Вейц В. Л., Дондошанский В. К., Гиреев В. И. Вынужденные колебания в металлорежущих станках. М.: Машгиз, 1959, 288 с.
5. Волчкевич Л. И. Надежность автоматических линий. М.: Машиностроение, 1969, 308 с.
6. Волчкевич Л. И., Кузнецов М. М., Усов Б. А. Автоматы и автоматические линии. М.: Высшая школа, 1976, ч. 1, 230 с., Ч. 2, 336 с.
7. Волчкевич Л. И., Усов Б. А. Автооператоры. М.: Машиностроение, 1974, 214 с.
8. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978, 208 с.
9. Вудсон У., Коновер Д. Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов. М.: Мир, 1968, 517 с.
10. Давыденко Э. П. Методы конструирования устройств ЭМАГО, ЛАТИНТИ, 1976, 62 с.
11. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д. Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1972, т. 1, 663 с., т. 2, 520 с.
12. Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник / Под ред. Н. С. Ачеркана. М.: Машиностроение, 1968, т. 1, 440 с.; т. 2, 472 с.; т. 3, 408 с.
13. Зинченко В. П., Мунипов В. М., Смолян Г. Л. Эргономические основы организации труда. М.: Экономика, 1974, 240 с.
14. Иоганек Т. Техническая эстетика изделий машиностроения / Пер. с чешского. М.: Машиностроение, 1969, 294 с.
15. Камышный Н. И. Автоматизация загрузки станков. М.: Машиностроение, 1977, 287 с.
16. Камышный Н. И. Основы художественного конструирования. Учебное пособие. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1970, 80 с.
17. Камышный Н. И., Стародубов В. С. Конструкции и наладка токарных автоматов и полуавтоматов. М.: Высшая школа, 1975, 424 с.
18. Карданский Л. Л., Найдин Ю. В., Чудаков А. Д. Централизованное управление машиностроительным оборудованием от ЭВМ. М.: Машиностроение, 1977, 263 с.
19. Кедров С. С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978, 200 с.
20. Киселев В. М. Фазовые системы числового программного управления станками. М.: Машиностроение, 1976, 352 с.
21. Киселев Г. В. Шпиндель изделия на аэро-статических опорах с питающими щелями. — Станки и инструмент, 1978, № 10, с. 20—25.
22. Коновалов В. М., Скрицкий В. Я., Рокшевский В. А. Очистка рабочих жидкостей в гидрприводах станков. М.: Машиностроение, 1976, 287 с.
23. Крапивенский З. Н., Использование ЭВМ в управлении качеством продукции. М.: Экономика, 1974, 72 с.
24. Кринский В. Ф., Ламцов И. В., Туркус М. А. Элементы архитектурно-пространственной композиции. М.: Изд. Литература по строительству, 1968, 167 с.
25. Крючков Ю., Мельников А. Пропорционирование станков. — Техническая эстетика, 1966, № 7, с. 21—23.
26. Кудинов В. А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967, 359 с.
27. Кузнецов М. М., Волчкевич Л. И., Замчалов Ю. П. Автоматизация производственных процессов. М.: Высшая школа, 1978, 431 с.
28. Лапин Ю. С., Устинов А. Г., Шехов Б. В. Рекомендации по эстетизации производственных цехов и участков. — Техническая эстетика, 1968, № 1, с. 17—23.
29. Лебедевский М. С., Федотов А. И. Автоматизация в промышленности. Л.: Лениздат, 1976, 254 с.
30. Левашов А. В. Основы расчета точности кинематических цепей металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1966, 212 с.
31. Лещенко В. А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением. М.: Машиностроение, 1975, 287 с.
32. Машиностроительный гидрпривод / Под ред. В. Н. Прокофьева. М.: Машиностроение, 1978, 496 с.
33. Макаров Л. Л. Станки с программным управлением и их эксплуатация. М.: Машиностроение, 1968, 142 с.
34. Мельников А. П. Проекты, исследования, гипотезы (о «золотом сечении») — Техническая эстетика, 1968, № 8, с. 6—10.
35. Металлорежущие станки / Под ред. проф. В. К. Тепинкичева. М.: Машиностроение, 1973, 472 с.
36. Михеев Ю. Е., Сосонкин В. Л. Системы автоматического управления станками. М.: Машиностроение, 1978, 400 с.

37. Нахапетян Е. Г. Определение критериев качества и диагностирования механизмов. М.: Наука, 1977, 140 с.
38. Опитц Г. Современная техника производства. М.: Машиностроение, 1975, 279 с.
39. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний. М.: Наука, 1971, 239 с.
40. Петрик М. И., Шишков В. А. Таблицы для подбора зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1973, 528 с.
41. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1978, 256 с.
42. Попов В. И., Локтев В. И. Динамика станков. Киев: Техника, 1975, с. 136.
43. Проников А. С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978, 592 с.
44. Проников А. С. Расчет и конструирование станков. М.: Высшая школа, 1967, 431 с.
45. Пуш А. В. Повышение точности шпиндельных узлов на гидростатических опорах. — Станки и инструмент, 1978, № 5, с. 13—16.
46. Пуш В. Э. Конструирование металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1977, 392 с.
47. Ратмиров В. А. Основы программного управления станками. М.: Машиностроение, 1978, 240 с.
48. Сомов Ю. С. Композиция в технике. М.: Машиностроение, 1972, 277 с.
49. Станки с числовым программным управлением (специализированные) / Под ред. В. А. Лещенко. М.: Машиностроение, 1979, 592 с.
50. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Наука, 1972, 480 с.
51. Телишевский Б. Х. Электрокопировальные станки. М.: Машиностроение, 1972, 88 с.
52. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский, И. А. Арутюнова, Т. М. Барсукова и др. М.: Машиностроение, 1977, 664 с.
53. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1975, 576 с.
54. Фигатнер А. М. Тенденции развития конструкций шпиндельных узлов с подшипниками качения. — Станки и инструмент, 1978, № 10, с. 16—18.
55. Шаумян Г. А. Комплексная автоматизация производственных процессов. М.: Машиностроение, 1973, 639 с.
56. Шухгальтер Л. Я. Управление качеством машин. М.: Машиностроение, 1977, 97 с.
57. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. Л.: Энергия, 1969, 375 с.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 3

Раздел 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ И ИХ КИНЕМАТИКЕ

Глава 1. Общие сведения	6	Глава 4. Кинематика станков для нарезания цилиндрических зубчатых колес	51
§ 1. Классификация, обозначения и характеристики групп станков	6	§ 1. Анализ перемещений инструмента и заготовки при нарезании цилиндрических зубчатых колес	51
§ 2. Основные понятия о кинематике станков	14	§ 2. Кинематическая настройка зубофрезерных и зубодолбежных станков	55
§ 3. Методы образования поверхностей и форм деталей	19	§ 3. Анализ перемещений инструмента и заготовки при отделке зубьев цилиндрических зубчатых колес	59
§ 4. Элементы базовой конструкции универсального токарно-винторезного станка мод. 16К20 и их общность по назначению с элементами других групп станков	21	Глава 5. Кинематика станков для нарезания конических зубчатых колес	63
Глава 2. Кинематические связи в металлорежущих станках	28	§ 1. Анализ перемещений инструмента и заготовки при нарезании конических зубчатых колес с прямыми зубьями	63
§ 1. Суммирующие механизмы	28	§ 2. Кинематическая настройка станков для нарезания конических колес с прямыми зубьями	65
§ 2. Простые и дифференциальные цепи. Назначение станков с дифференциальными цепями	31	§ 3. Анализ перемещений инструмента и заготовки при нарезании конических зубчатых колес круговыми зубьями	71
§ 3. Точные и приближенные настройки кинематических цепей	31	§ 4. Кинематическая настройка станков для нарезания конических колес с круговыми зубьями	72
§ 4. Делительные механизмы	35	Глава 6. Кинематическая точность и разработка кинематики при проектировании металлорежущих станков	75
Глава 3. Кинематика координатно-расточных, затыловочных и резьбообрабатывающих станков	40	§ 1. Факторы, определяющие точность кинематических цепей	75
§ 1. Анализ кинематики координатно-расточных станков	40	§ 2. Повышение кинематической точности станков	76
§ 2. Анализ кинематики затыловочных станков	42	§ 3. Проектирование кинематических схем станков	78
§ 3. Анализ кинематики резьбофрезерных станков	45		
§ 4. Анализ кинематики резьбошлифовальных станков	48		

Раздел 2. РАСЧЕТЫ КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Глава 7. Основные технические показатели станков	79	Глава 10. Шпиндельные узлы станков	110
§ 1. Развитие конструкций станков	79	§ 1. Шпиндели станков	110
§ 2. Технические показатели станков	80	§ 2. Подшипники качения	113
§ 3. Компонировка станка	81	§ 3. Подшипники скольжения	116
§ 4. Этапы проектирования и изготовления новых станков	82	§ 4. Расчет шпиндельного узла на жесткость с использованием ЭВМ	120
Глава 8. Анализ работоспособности станков	85	Глава 11. Базовые детали и механизмы	122
§ 1. Модель для оценки работоспособности станка	85	§ 1. Силы, действующие на корпусные детали станков	122
§ 2. Начальные (статические) показатели качества станка	87	§ 2. Станины станков	123
§ 3. Стойкость станка к действию вредных процессов	92	§ 3. Направляющие станков	125
Глава 9. Привод станков	96	Глава 12. Механизмы станков	129
§ 1. Структура привода со ступенчатым регулированием	96	§ 1. Механизмы перемещения рабочих органов станка	129
§ 2. Графоаналитический метод кинематического расчета приводов со ступенчатым регулированием	98	§ 2. Механизмы изменения скоростей	132
§ 3. Пример кинематического расчета коробки скоростей	101	§ 3. Механизмы обеспечения точности обработки	133
§ 4. Основные типы коробок скоростей и подач	104	§ 4. Механизмы ручного управления станком	136
§ 5. Особенности силовых расчетов коробок скоростей и подач	108	Глава 13. Эксплуатация станков	138
		§ 1. Установка станков на фундаменты и опоры	138
		§ 2. Проверка и испытание станков	140
		§ 3. Ремонт и обслуживание станков	141

Раздел 3. ДИНАМИКА СТАНКОВ

Глава 14. Динамическая система станка и ее показатели	144	Глава 16. Автоколебания в металлорежущих станках	165
§ 1. Понятие о замкнутой динамической системе станков	144	§ 1. Динамические характеристики основных процессов в станках	165
§ 2. Статические характеристики основных элементов ДС станков	146	§ 2. Автоколебания в станках при потенциально-устойчивой упругой системе	167
§ 3. Частотные методы анализа ДС станков	149	§ 3. Автоколебания в станках при потенциально неустойчивой упругой системе	170
§ 4. Основные показатели динамического качества станков	151	Глава 17. Экспериментальные методы исследования динамической системы станков	174
Глава 15. Расчет вынужденных колебаний систем станка	153	§ 1. Средства измерения параметров динамической системы станков	174
§ 1. Вынужденные колебания в станках. Общие сведения	153	§ 2. Экспериментальные методы исследования виброустойчивости станков	179
§ 2. Вибронейтрализация станков	158		
§ 3. Динамика привода станков	160		
§ 4. Критическая частота вращения шпинделя	163		

Раздел 4. НАДЕЖНОСТЬ СТАНКОВ

Глава 18. Методы оценки и расчета надежности	184	§ 2. Расчет на износ направляющих скольжения	197
§ 1. Основные понятия и показатели	184	§ 3. Расчет предельно-допустимых износов	201
§ 2. Модели параметрических отказов	188	§ 4. Основные методы повышения износостойкости станков	202
§ 3. Прогнозирование параметрической надежности	191	Глава 20. Обеспечение надежности	202
§ 4. Надежность сложных систем	193	§ 1. Технологическая надежность станков	202
Глава 19. Износ станка и его механизмов	195	§ 2. Испытание станков на надежность	204
§ 1. Износ как основная причина потери станком работоспособности	195	§ 3. Анализ потоков отказов сложных систем	208
		§ 4. Связь системы ремонта станка с его надежностью	209
		§ 5. Источники информации о надежности станков	210

Раздел 5. ХУДОЖЕСТВЕННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ СТАНКОВ

Глава 21. Общественное производство и эстетизация промышленной среды	212	Глава 22. Гармонизация формы	220
§ 1. Развитие производства и художественного конструирования (дизайна)	212	§ 1. Композиция	220
§ 2. Эргономика	214	§ 2. Гармонизация формы станков пропорционированием	224
§ 3. Инженерная психология	216	§ 3. Цвет и функциональная окраска в промышленности	226
§ 4. Художественно-конструкторский анализ и задание на проектирование	218	§ 4. Промышленный интерьер и экстерьер	228

Раздел 6. ГИДРОПНЕВМООБОРУДОВАНИЕ СТАНКОВ

Глава 23. Гидравлические и пневматические устройства станков	230	Глава 24. Агрегаты и аппаратура гидро- и пневмосистем станков	243
§ 1. Составление схемы гидро-, пневмо- и пневмогидросистем станка	230	§ 1. Насосы и гидромоторы гидросистем станков	243
§ 2. Принцип расчета гидро- и пневмосистем станков	234	§ 2. Гидро- и пневмоцилиндры	247
§ 3. Основные элементы гидро- и пневмосистем станков	237	§ 3. Гидроусилители и аппаратура управления	249
§ 4. Рабочая среда, ее свойства и аппаратура, применяемая для подготовки жидкости и воздуха для работы в гидросистемах станков	241	§ 4. Основные методы расчета клапанов	253
		§ 5. Гидропанели	256

Глава 25. Гидро- и пневмосистемы станков	257	§ 2. Гидросистемы копировальных станков	259
§ 1. Гидросистемы шлифовальных станков	257	§ 3. Гидро- и пневмосистемы станков с программным управлением	261
		§ 4. Гидро- и пневмогидросистемы агрегатных станков	267

Раздел 7. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТОВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Глава 26. Ступени автоматизации производства	270	§ 1. Дифференциация технологического процесса и автоматизация машин как пути повышения производительности	305
§ 1. Техничко-экономические и социальные аспекты автоматизации	270	§ 2. Однопозиционные автоматы с одноинструментной обработкой	309
§ 2. Автоматизация рабочих машин	271	§ 3. Однопозиционные автоматы с многоинструментной обработкой	310
§ 3. Автоматизация системы машин	274	Глава 30. Принципы построения многопозиционных автоматов и автоматических линий	312
§ 4. Методы и средства автоматизации в массовом и серийном производствах. Применение ЭВМ	277	§ 1. Концентрация операций как основа создания многопозиционных машин	312
Глава 27. Основные типы автоматов	278	§ 2. Автоматы и линии последовательного действия	314
§ 1. Структура автоматов	278	§ 3. Автоматы и линии параллельного действия	317
§ 2. Типовые целевые механизмы, устройства и системы управления	281	§ 4. Машины и линии последовательно-параллельного действия	321
§ 3. Универсальные и специальные автоматы в условиях массового производства	286	Глава 31. Основные этапы проектирования автоматов и автоматических линий	324
Глава 28. Производительность автоматов и автоматических линий	290	§ 1. Специфика проектно-конструкторских задач при автоматизации массового и серийного производства	324
§ 1. Процессы функционирования машин во времени	290	§ 2. Вариантность технических решений на ранних стадиях проектирования	325
§ 2. Теоретическая и фактическая производительность	292	§ 3. Формирование общей совокупности вариантов построения систем машин	328
§ 3. Производительность в условиях массового и серийного производства	297		
§ 4. Методы расчета и анализа производительности автоматизированного оборудования	300		
Глава 29. Принципы построения однопозиционных автоматов	305		

Раздел 8. ЦЕЛЕВЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Глава 32. Транспортно-загрузочные устройства автоматов и автоматических линий 333 § 1. Механизмы питания для пруткового материала 333 § 2. Механизмы питания для штучных заготовок 334 § 3. Вибрационные загрузочные устройства 338 § 4. Конвейерные системы автоматических линий 344 Глава 33. Промышленные роботы 346 § 1. Область применения и классификация 346 § 2. Структура и механизмы роботов. Управление роботами 348 § 3. Конструктивный анализ и расчет роботов 351	§ 4. Системы автоматической смены инструментов 354 Глава 34. Механизмы зажима обрабатываемых деталей 357 § 1. Классификация зажимных механизмов 357 § 2. Конструкции механизмов зажима 358 § 3. Выбор привода и расчет механизмов зажима 359 Глава 35. Поворотно-фиксирующие механизмы 363 § 1. Классификация поворотнo-фиксирующих механизмов 363 § 2. Механизмы поворота 364 § 3. Механизмы фиксации 367

Раздел 9. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАНКАМИ

Глава 36. Общая характеристика и классификация систем автоматического управления станками 369 § 1. Общие понятия и определения 369 § 2. Управление обработкой на станке как процесс передачи и преобразования информации в системе чертеж — деталь 371 § 3. Классификация систем автоматического управления и их сравнительный анализ 372 Глава 37. Системы управления с РВ и циклового программного управления 374 § 1. Системы управления с РВ, их принцип работы и классификация 374 § 2. Особенности расчета и проектирования систем управления с РВ 377 § 3. Системы циклового программного управления 380 Глава 38. Следящие системы автоматического управления 383 § 1. Устройство и характеристика следящих систем управления станками 383	§ 2. Особенности проектирования следящих систем управления 386 § 3. Следящие копировальные системы управления 387 Глава 39. Системы числового программного управления 391 § 1. Основные принципы числового программного управления станками 391 § 2. Классификация систем ЧПУ 396 § 3. Типовая система ЧПУ и характеристика ее устройств 401 § 4. Особенности конструкции и эксплуатации станков с ЧПУ 411 Глава 40. Самоприспосаблиющиеся (адаптивные) системы управления 416 § 1. Основные принципы построения самоприспосаблиющихся систем управления 416 § 2. Классификация самоприспосаблиющихся систем управления, их характеристика 418 § 3. Сравнительный анализ систем автоматического управления и перспективы их развития 420

Раздел 10. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Глава 41. Проблемы и пути автоматизации производственных процессов	423	§ 3. Автоматизация на базе специального оборудования	448
§ 1. Основные критерии оценки техники	423	§ 4. Автоматизация на базе роторных машин	449
§ 2. Анализ производительности труда при автоматизации	427	§ 5. Автоматизация на базе станков с ЧПУ	451
§ 3. Основные направления развития автоматизации	430	Глава 44. Системы управления при автоматизации производственных процессов	454
Глава 42. Структура и производительность автоматических линий	433	§ 1. Классификация систем управления технологическими комплексами	454
§ 1. Структура автоматических линий	433	§ 2. Управление качеством	456
§ 2. Производительность автоматических линий при различных структурных вариантах	435	§ 3. Автоматизированные системы управления технологическими процессами	462
§ 3. Расчет числа участков автоматической линии	438	Глава 45. Выбор оптимальных вариантов построения автоматических станочных систем	467
§ 4. Емкость межоперационных накопителей	441	§ 1. Техничко-экономические показатели эффективности автоматизации	467
Глава 43. Основные типы автоматических станочных систем	443	§ 2. Выбор оптимальных вариантов построения систем машин	469
§ 1. Автоматизация на базе типового оборудования	443	Список литературы	473
§ 2. Автоматизация на базе агрегатных станков	445		

ИБ № 2269

*Александр Сергеевич Проников,
Николай Иванович Камышный,
Леонид Иванович Волчкевич,
Михаил Михайлович Кузнецов,
Борис Никитич Кузнецов,
Виктор Семенович Стародубов,
Борис Андрианович Усов,
Петр Михайлович Чернянский,*

Редактор *Е. С. Забалуева*

Художественный редактор *И. К. Капралова*

Технические редакторы *А. И. Захарова, Н. В. Тимофеевко*

Корректоры *Л. Л. Георгиевская, Л. Е. Хохлова*

Оформление художника *С. Н. Орлова*

Сдано в набор 19.03.81.

Подписано в печать 26.11.81. Т—30017. Формат 70×100¹/₁₆.

Бумага офсетная. Гарнитура литературная.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 39,0. Уч.-изд. л. 43,0.

Тираж 35 000 экз. Заказ 785. Цена 2 р.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромный пер., 4.

Ордена Трудового Красного Знамени
Чеховский полиграфический комбинат
ВО «Союзполиграфпром»

Государственного комитета СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Чехов Московской области

**МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ
СТАНКИ И АВТОМАТЫ**

ВНИМАНИЕ!

Перед пользованием книгой необходимо внести следующие исправления.

ПОПРАВКИ

1. Стр. 32 левая колонка, второй абзац, после слов «числа зубьев сменных колес» следует читать:

Пример. Нарезать резьбу с шагом $P_n = 2,5$ мм. Шаг ходового винта $P = \frac{1''}{4}$, набор сменных колес пятковый.

2. Стр. 33 левая колонка, первый абзац, после слов «при этом ведущими считают вторые два колеса» следует читать:

Пример. Подобрать сменные колеса гитары для нарезания резьбы с шагом $P_n = 3$ мм; шаг ходового винта $P_x = \frac{1''}{2}$.

$$i_x = \frac{P_n}{P_x} = \frac{3 \cdot 2}{25,4} = 0,2362204.$$

По таблицам находим число, близкое к полученному, и выписываем числа зубьев сменных колес: $i_{x_1} = 0,2362169 = \frac{33 \cdot 47}{67 \cdot 98}$.

Определяем относительную погрешность настройки:

$$\delta = \frac{(i_{x_1} - i_x)}{i_x} = \frac{(0,2362169 - 0,2362204)}{0,2362204} = -0,0000148.$$

Суммарная погрешность на длине 1 м $\Delta L = \delta L = -0,0000148 \cdot 1000 = -0,0148$ мм. Точность настройки высока.

3. Стр. 302 правая колонка, последний абзац, после слов «(смена из-за поло-» следует читать:

мок или затупления, регулировка без замены); простои по оборудованию с

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Колонка	Строка	Напечатано	Следует читать
23	Правая	7-я снизу	...2;8...	...2,8...
36	Левая	3-я снизу	$\frac{b}{a} \frac{z}{z_0} = \frac{1}{z} \dots$	$\frac{b}{a} \frac{K}{z_0} = \frac{1}{z} \dots$
53	Правая	4-я снизу	$\dots n_{\phi} \frac{z_1}{z_2}$ об. заготовки	$\dots n_{\phi} \frac{k_{\phi}}{z}$ об. заготовки
57	Левая	12-я снизу	$T = \frac{\pi m z}{\sin \beta} e,$	$T = \frac{\pi m z}{\sin \beta},$
73	Правая	4-я снизу	$\dots i_x = \frac{75}{z}$	$\dots i_x = \frac{7,5}{z}$
148	Таблица 9, графа 3	1-я сверху	$y_{11} = [\dots$	$y_{11} = - [\dots$
305	Левая	22-я снизу	$y_{12} = [\dots$	$y_{12} = - [\dots$
317	»	1-я снизу	...шеек 1—6...	...шеек а—е...
353	Правая	9-я сверху	... (рис. 257, з) ...	... (рис. 256, з) ...
410	»	10-я снизу	..., Н.	..., дН.
428	Левая	10-я снизу	...детали, Н.	...детали, дН.
469	»	7-я снизу	... (рис. 345, а) ...	... (рис. 345) ...
		23-я сверху	...на семь лет...	...на L лет...
			...электроэнергию.	...электроэнергию. Сроки окупаемости целесообраз-

