

Автоматизация процессов машиностроения

Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве
учебного пособия для студентов
машиностроительных специальностей вузов

Под редакцией
доктора технических наук
А. И. Дашенко



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1991

ББК 34.4
А22
УДК 621

Я. Буда, В. Гановски, В. С. Вихман, А. И. Дашенко,
В. П. Божков, Л. В. Божкова

Рецензенты:

кафедра гибких автоматизированных комплексов (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А. И. Федотов) Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина;

проректор по научной работе Украинского заочного политехнического института проф. М. К. Кравцов

Автоматизация процессов машиностроения: Учеб. пособие
А22 для машиностр. спец. вузов / Я. Буда, В. Гановски, В. С. Вихман и др.; Под ред. А. И. Дашенко. — М.: Высш. шк., 1991. — 480 с.: ил.

ISBN 5-06-000714-6

Книга является первым учебным пособием, подготовленным авторским коллективом специалистов нескольких стран, и обобщает опыт преподавания автоматизации процессов машиностроения в СССР, Болгарии, ЧСФР. В ней рассмотрены вопросы автоматизации массового, серийного и мелкосерийного машиностроения, изложены теории оптимизации технологических процессов и схем построения систем машин, методы расчета роботов, средств автоматического контроля, систем управления. Большое внимание уделено заводу будущего.

А 2701000000(4309000000) — 151
001(01) — 91 335—90

ББК 34.4
6П.5

ISBN 5-06-000714-6

© Коллектив авторов, 1991

Предисловие

Данное учебное пособие обобщает опыт исследования, проектирования автоматических линий, гибких производственных систем и отдельных модулей, опыт их эксплуатации и может быть полезно студентам при изучении курсов «Технология машиностроения», «Автоматизация производства», «Проектирование автоматических линий». Книга обобщает многолетний преподавательский опыт авторов, а также результаты исследований, выполненных в Московском автомеханическом институте (МАМИ), в Высшей технической школе (г. Кошице ЧСФР), в Высшем машино-электротехническом институте им. В. И. Ленина (г. София, Болгария).

Материал книги распределяется между авторами следующим образом: проф. д-р. техн. наук А. И. Дашенко (Московский автомеханический институт) — главы 1-5; чл.-кор. Академии наук Словакии д-р техн. наук Я. Буда — § 6.1 — 6.3, 6.5, 6.6, гл. 7 и 8; канд. техн. наук В. Гановски — гл. 9; канд. техн. наук Л. В. Божкова — гл. 10; канд. техн. наук В. П. Божков — § 6.4; д-р техн. наук В. С. Вихман — гл. 11.

Авторы выражают благодарность рецензентам кафедре гибких автоматизированных комплексов Ленинградского государственного технического университета (зав. кафедрой проф. А. И. Федотов) и канд. техн. наук М. К. Кравцову за добрые советы и полезные замечания, а также будут признательны читателям за пожелания и замечания, которые можно направить по адресу: 101430, Москва ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».

Авторы

Введение

Для современного развития автоматизации процессов машиностроения характерны три главные тенденции.

Первая тенденция — широкое применение метода концентрации (совмещения) элементарных технологических операций при создании автоматического оборудования для массового, серийного и мелкосерийного производства. Концентрация операций в одной рабочей машине резко повышает ее производительность, позволяет быстро окупить затраты на автоматизацию.

Вторая тенденция — использование метода агрегатирования (агрегатно-модульного принципа построения) металлорежущих станков-автоматов и автоматических линий, сборочных машин, контрольных, транспортных устройств, роботов и систем управления, что в несколько раз сокращает сроки проектирования и изготовления средств автоматизации и оборудования, создает возможность его переконфигурации и переналадки при изменении объекта производства.

Третья тенденция — применение микропроцессорной техники и компьютеров для управления технологическими процессами на всех уровнях (включая управление качеством продукции), что создает гибкость производства, высокую надежность управляющих систем, позволяет реализовать большие потенциальные возможности современных технологий.

Сочетание этих тенденций обеспечивает высокую эффективность только в случае выбора наиболее рациональных по концентрации операций параметров агрегатного оборудования и технологических систем в целом (структура процесса, компоновочные схемы линий, режимы работы). Отсюда — важность разработки научно-технических основ оптимального агрегатирования технологических систем машин (ТСМ), т. е. научно обоснованных методов, которые позволили бы по заданным исходным данным формировать общую совокупность технически возможных вариантов, проводить их сравнительный анализ и отбор вплоть до выделения оптимального по выбранным критериям варианта.

Бурное развитие вычислительной техники, в том числе микропроцессоров, создало широкие возможности для применения гибкого высокоавтоматизированного оборудования в самых различных областях

промышленности и прежде всего в машиностроении. По данным акад. В. М. Глушкова, за 25 лет, прошедших с начала применения первых ЭВМ в СССР, они уменьшились по объему в 300 000 раз, быстродействие их увеличилось в 10 000 раз, цена в расчете на одну выполненную операцию снизилась в 100 000 раз. Успехи в этой области создали у ряда специалистов впечатление, что применение компьютеров на различных стадиях производственного процесса уже само по себе способно резко повысить эффективность производства. Практика же показывает, что даже самые совершенные ЭВМ позволяют лишь наиболее полно реализовать возможности современных технологий и технологического оборудования, но не могут дать большего эффекта, чем сам технологический процесс. Поэтому при проектировании гибких станочных модулей, ячеек, автоматических линий и участков первостепенное значение имеет разработка наиболее рационального (оптимального по принятым критериям) технологического процесса обработки деталей и выбор или проектирование станочного или сборного оборудования, позволяющего осуществить этот процесс.

Автоматизированное машиностроительное производство характеризуется постоянным наращиванием выпуска продукции, резким повышением требований к ее качеству, все более частой сменяемостью моделей машин и приборов, позволяющей непрерывно совершенствовать их конструкции. Отсюда возникает необходимость организации гибкого, переналаживаемого производства, внедрения гибкого технологического оборудования во всех типах производства — от мелкосерийного до массового. Главное условие здесь — обеспечение максимальной экономической эффективности, т. е. производство изделий с минимальными затратами труда и денежных средств.

Все это позволяет сформулировать основные направления его совершенствования:

- 1) повышение технологичности деталей, сборочных единиц и изделий в целом, унификация их конструкций;

- 2) повышение точности и качества заготовок, обеспечение стабильности припуска, совершенствование существующих и создание новых методов получения заготовок, снижающих их стоимость и расход металла;

- 3) создание автоматических линий и систем машин для комплексного изготовления деталей и сборки изделий с включением всех операций технологического процесса (заготовительных, обработки резанием, термической обработки, гальванопокрытий, контроля, сборки, консервации, упаковки и др.);

- 4) повышение степени концентрации операций технологического процесса и связанное с этим усложнение структур ТСМ;

- 5) развитие прогрессивных технологических процессов — основы эффективной автоматизации производства, создание новых методов обработки деталей, выбор наиболее эффективной структуры процессов и структурно-компоновочных схем оборудования, разработка новых

типов и конструкций режущих инструментов, обеспечивающих высокую производительность и качество обработки;

6) повышение степени непрерывности процессов, замена, где это возможно, дискретных процессов непрерывными, более широкое применение систем машин непрерывного действия (роторных и роторно-конвейерных линий), совмещающих во времени технологические и транспортные операции;

7) развитие идеи агрегатирования и модульного принципа создания станков, станочных систем и других средств автоматизации: сборочных машин и сборочных линий, загрузочных и транспортных устройств, промышленных роботов, систем управления; разработка на основе стандартных модулей автоматических систем машин, позволяющих быстро перестраивать оборудование, обеспечивающих гибкость производства;

8) расширение работ в области автоматизации процессов сборки изделий, применение автоматизированных линий синхронного и несинхронного типа, позволяющих сочетать автоматические сборочные операции с операциями, выполняемыми вручную; применение сборочных роботов, создание роботизированных комплексов машин, в том числе быстроперенастраиваемых;

9) более широкое использование вычислительной техники (программируемых контроллеров, мини-ЭВМ и др.) для управления работой оборудования, диагностирования его технического состояния, быстрой перестройки производства, повышения эксплуатационной надежности оборудования; как результат этого — создание полностью автоматизированных производств (цехов и заводов-автоматов), где технологический процесс реализуется без непосредственного участия рабочих-операторов;

10) разработка и применение систем комплексного проектирования на ЭВМ: конструкций изделий; технологических процессов изготовления деталей и сборки машин; технологического оборудования и средств автоматизации производства.

Успешно решить эти задачи можно при углублении научных исследований в области автоматизации производства, формировании фундаментальных теоретических основ автоматизации процессов машиностроения, опережающей подготовке инженерных кадров в области автоматизации.

Первоочередными в области создания станочных и сборочных линий можно считать такие проблемы, как:

1) развитие теории комплексной оптимизации технологических процессов механосборочного производства, включающей в себя выбор или разработку наиболее эффективных методов выполнения операций обработки поверхностей деталей, а также выбор наиболее рациональной по концентрации операций структуры процессов;

2) разработка методов оптимального многопараметрического синтеза комплексных технологических систем машин, позволяющих без полного перебора всех возможных вариантов вести направленный

поиск таких схемных и структурно-компоновочных решений, которые обеспечивают в каждом конкретном случае заданный годовой выпуск деталей необходимого качества с наилучшими технико-экономическими показателями.

3) разработка методов сравнительного анализа, выбор типажа, оптимальных параметров и конструктивных решений, определение области наиболее эффективного применения основных средств автоматизации производства, т. е. силовых узлов и транспортных устройств автоматических систем машин, манипуляторов и промышленных роботов, контрольных автоматов, механизмов автоматической сборки и др.; разработка методов повышения их надежности, быстродействия и точности, улучшения динамических характеристик;

4) разработка организационно-технических основ, методов и средств рациональной эксплуатации станочных систем, которые обеспечили бы наиболее полную реализацию возможностей оборудования для достижения расчетных значений производительности, ритмичности производства, качества обработки, себестоимости продукции;

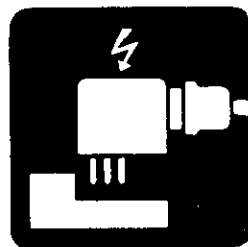
5) развитие методов расчета экономической эффективности автоматизации и методов экономического обоснования применяемых решений с учетом технических, социальных, психологических и экономических факторов.

При этом главным является не только существенное увеличение применяемых в производстве средств автоматизации и механизации, но и качественное изменение работ в этой области, переход от локальных задач к комплексным.

В данном учебном пособии авторы не стремились подробно осветить все перечисленные направления. Одни из них еще недостаточно разработаны, другие подробно освещены в технической литературе. Главное назначение книги — на основе единого научно-методического подхода рассмотреть проблемы автоматизации массового, серийного и мелкосерийного машиностроительного (главным образом механосборочного) производства, а также методы их решения, обобщить современные достижения в области создания средств автоматизации и методов их расчета.

РАЗДЕЛ 1

Автоматические линии и системы машин для массового механосборочного производства



Глава 1

ТИПЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИН, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРА

Широкое развитие автоматизации процессов машиностроения, особенно процессов механосборочного производства, связано с созданием технологических систем машин (ТСМ) — станочных и сборочных линий, отличающихся сложной структурой и предназначенных для полной обработки деталей, контроля, сборки, испытания изделий. Технологические системы машин широко используются в массовом производстве и начинают применяться в серийном и мелкосерийном производстве, где они создаются из гибких обрабатывающих или сборочных модулей и робототехнических комплексов.

Особенно перспективно создание ТСМ по агрегатно-модульному принципу, из рационально ограниченного набора унифицированных элементов (агрегатов), скомпонованных в самостоятельные ячейки-модули, объединенные единой транспортной системой и системой управления. Эффективность использования ТСМ в машиностроении определяется большим числом факторов, важнейшие из которых: рационально спроектированный технологический процесс; структурно-компоновочные схемы модулей и ТСМ в целом, их надежность, точность, стоимость; возможности разработанной системы управления, обеспечивающей рациональную эксплуатацию автоматизированного оборудования, заданную программу выпуска и качество продукции.

Вследствие сложности самих ТСМ и большой вариантности возможных решений при разработке технологических процессов, выборе или проектировании оборудования, средств автоматизации, системы управления создание высокоэффективных систем машин (основанных на оптимальных конструкторско-технологических решениях) является одной из наиболее сложных проблем автоматизации машиностроительного производства.

Автоматические станочные линии выполняют операции, необходимые для полного изготовления очень сложных и трудоемких деталей: черновую и чистовую обработку поверхностей резанием, окончательную (отделочную) обработку наиболее ответственных поверхностей, проверку точности размеров и формы, а также шероховатости поверхности, проверку герметичности, физико-механических свойств, термическую обработку, подгонку по массе, балансировку, операции сборки, мойку, консервацию и упаковку. Широко применяются комплексные автоматические системы, включающие в себя машины для получения заготовок (литейные, сварочные агрегаты, штамповочные машины), многопозиционные станки наряду с участками станочных линий блокированного типа, сборочное оборудование, контрольные автоматы и др.

Создаются линии для литья заготовок,ковки и штамповки, сварки сложных изделий (например кузовов автомобилей) с применением сварочных роботов, для гальванопокрытий, сборки, упаковки и консервации изделий.

По сравнению с неавтоматизированным производством эффективность применения автоматических линий достигается благодаря существенному росту производительности, снижению себестоимости изготовления деталей, резкому уменьшению трудоемкости изготовления продукции и численности производственного персонала, повышению качества изделий и ритмичности их выпуска, уменьшению производственной площади.

Автоматические станочные линии широко распространены на заводах автомобильной, подшипниковой и электротехнической промышленности, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения, в приборостроении, при производстве товаров широкого потребления. Например, около 70 % металлорежущего оборудования по производству двигателей автомобиля ВАЗ установлены в автоматических линиях. На КамАЗе в производстве дизельных двигателей оборудование, встроенное в автоматические линии, достигает 80 %.

Автоматическая линия (АЛ) — это система рабочих машин-автоматов, расположенных в технологической последовательности, объединенных автоматическими устройствами и механизмами для обработки, сборки и контроля изделий, транспортирования и хранения их в процессе изготовления с целью выполнения законченной части или всего технологического процесса изготовления одного или нескольких изделий. Важнейшей составляющей АЛ является система управления их функционированием, использующая микропроцессорную технику или непосредственно ЭВМ и координирующая работу технологического и вспомогательного оборудования, включая управление процессом обслуживания АЛ и качеством продукции, решение оптимизационных задач, связанных с производством продукции.

Сложные по структуре и выполняемым функциям АЛ называют технологическими системами машин (ТСМ).

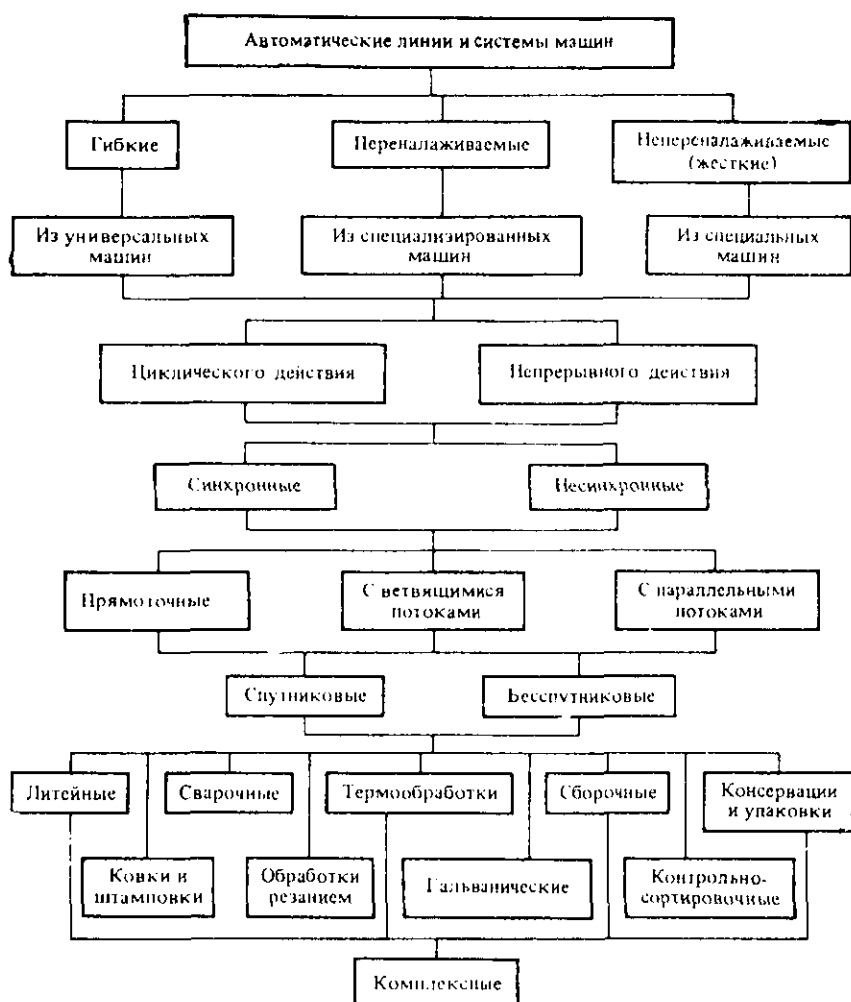


Рис. 1.1. Классификация автоматических линий по основным признакам

Вследствие большого разнообразия изготавливаемых на линиях объектов производства, а также различного технологического назначения, заданных программ выпуска и других факторов автоматические линии различаются по структурным и конструктивно-компоновочным признакам, основные из которых представлены в классификационной схеме (рис. 1.1).

Среди этих признаков наиболее важный — это степень гибкости ТСМ. Гибкость технологического оборудования, позволяющая быстро перестраивать производство на новые, более совершенные виды про-

дукции, является основным требованием любого типа производства, от мелкосерийного до массового, но в наибольшей степени оно характерно для мелкосерийного и серийного выпуска продукции, где конструкции изделий меняются наиболее часто.

По этому признаку АЛ можно разделить на три группы: гибкие; переналаживаемые (с ограниченной гибкостью); непереналаживаемые (жесткие), предназначенные для одного вида изделия.

Гибкая автоматическая линия (ГАЛ) — это совокупность оборудования с ЧПУ, предназначенного для обработки деталей или сборки изделий широкой номенклатуры (в пределах технологических возможностей рабочих машин) и обладающая свойством автоматизированной (программируемой) переналадки. В состав ГАЛ кроме технологического оборудования входят такие автоматизированные системы, как транспортная (ТАС), инструментального обеспечения (АСИО), удаления отходов (АСУО), обеспечения качества (АСОК), надежности (АСОН), управления (АСУ).

Гибкие автоматизированные линии komponуются из универсального оборудования с ЧПУ, обладающего широкими технологическими возможностями. Область применения таких линий — мелкосерийное и серийное производство.

Переналаживаемая автоматическая линия (ПАЛ) предназначена для изготовления значительно более узкой номенклатуры изделий, вследствие чего она обладает ограниченной гибкостью и полностью автоматическая переналадка оборудования при переходе на другие изделия экономически нецелесообразна (большая часть работ по переналадке выполняется вручную). Заранее известная номенклатура изделий позволяет спроектировать технологический процесс на основе более высокой концентрации элементарных операций, чем при использовании ГАЛ, и применить многошпиндельное и даже многопозиционное специализированное оборудование, что существенно повышает экономическую эффективность автоматизации. Область применения ПАЛ — серийное, крупносерийное и массовое производство.

Непереналаживаемые автоматические линии (НАЛ) создаются для изделий массового выпуска, конструкция которых в течение длительного времени не изменяется (например, ряд типов подшипников качения, крепежные детали, зубчатые колеса и т.д.). Это позволяет реализовать на таких линиях самый рациональный для данного изделия технологический процесс, основанный на очень высокой концентрации операций, и применить многопозиционное многошпиндельное оборудование, специально спроектированное для данного изделия. Экономическая эффективность автоматизации в таких условиях самая высокая, однако «жесткая» автоматизация не всегда позволяет непрерывно совершенствовать морально стареющую продукцию, что в определенных условиях может отрицательно сказаться на эффективности производства. Очевидно, что на одном и том же предприятии могут использоваться все три типа АЛ.

Другой важный признак классификации АЛ — принцип перемещения изделий в процессе изготовления (циклическое или непрерывное), что принципиально влияет на конструкцию как рабочих машин, так и транспортных и других устройств линии.

На линиях *циклического* (дискретного) действия изделие в процессе изготовления не меняет своего положения в пространстве и лишь после завершения технологических переходов на одной рабочей машине перемещается к другой для выполнения следующих переходов, т. е. процесс имеет циклический характер.

На линиях *непрерывного действия* (роторных и роторно-конвейерных) процесс изготовления изделия совмещен с процессом его транспортировки, поэтому при дискретном характере выполнения каждого технологического перехода степень непрерывности самого процесса повышается. Кроме того, применение роторных машин создает благоприятные возможности для параллельного выполнения (с небольшим сдвигом по фазе) ряда одинаковых технологических переходов на одном рабочем роторе. А использование в линии рабочих роторов разных диаметров позволяет выполнять в ней (без потери времени на ожидание) технологические переходы разной длительности, что обеспечивает очень высокую производительность роторных и роторно-конвейерных линий. Однако невозможность выполнять в каждой рабочей позиции ротора несколько технологических переходов с разных сторон изделия ограничивает применение этого высокопроизводительного оборудования сравнительно простыми изделиями небольших и мелких размеров.

По типу связей между позициями (или рабочими машинами) линии делятся на синхронные (с жесткой связью между позициями) и несинхронные (с гибкой связью).

В *синхронной АЛ* изделия передаются от позиции к позиции непосредственно и остановка одной из них приводит к остановке всей линии. В несинхронной линии между позициями имеется небольшой запас заготовок или изделий, что позволяет при остановке одной из позиций работать остальным некоторое время, определенное величиной этого запаса.

Несинхронные линии особенно эффективны на сборочных операциях, где на отдельных позициях сборочные переходы выполняются вручную и время их выполнения зависит от качества сопрягаемых деталей. По этому признаку сложные ТСМ можно отнести к комбинированным системам, так как они состоят из нескольких участков. На каждом из участков позиции связаны между собой жестко, а участки — гибко через магазины-накопители (см. типовые структурные схемы АЛ на рис. 1.2).

Первоначально АЛ создавались как однопоточные, состоящие из одного или нескольких последовательно работающих участков. В дальнейшем вследствие необходимости повышения производительности АЛ начали дублировать позиции, где длительность технологических переходов была наибольшей. Это привело к разделению потоков изделий на

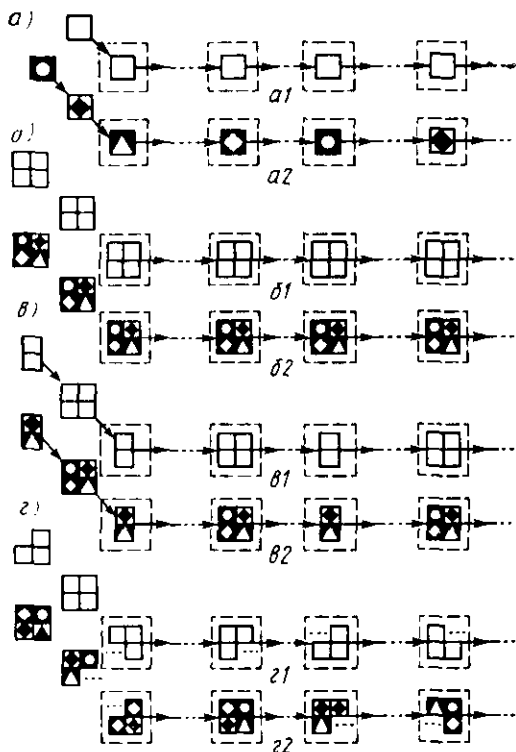
Рис. 1.2. Типовые схемы технологических потоков в АЛ:

а — однопоточной обработки; б — групповой обработки; а1; б1; в1; г1 — однопредметной обработки; а2; б2; в2; г2 — многопредметной обработки; а, б — постоянной плотности; в, г — переменной плотности

отдельных участках и повышению производительности линий благодаря дублированию лимитирующих позиций (линии с ветвящимися потоками изделий). В тех случаях, когда необходимо дублировать большинство рабочих позиций для получения заданной производительности, проектируют линии с параллельными потоками.

Заготовки или изделия на рабочих позициях устанавливаются и закрепляются либо непосредственно в приспособлениях рабочих машин, либо в приспособлениях-спутниках, перемещаемых вместе с изделием. По этому признаку АЛ подразделяют на *спутниковые* и *беспутниковые*. В каждом приспособлении или спутнике можно закрепить одно, несколько одинаковых или несколько разных изделий (заготовок).

Наконец, АЛ целесообразно подразделять в зависимости от их технологического назначения. Большинство линий предназначено для выполнения одного вида технологических операций: штамповки, обработки заготовок резанием, сборки и т. д. Однако в последние годы стали широко применяться АЛ и ТСМ, сочетающие выполнение различных технологических операций, обеспечивающих полную обработку заготовок или полное изготовление изделий. Такие АЛ называют *комплексными*, они используются в автомобильной, подшипниковой промышленности, тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, электромашиностроении и других отраслях.



Глава 2

АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ И СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ

Интенсивный рост выпуска продукции машиностроения предъявляет высокие требования к производительности автоматизированного оборудования, что достигается обычно узкой его специализацией, т. е. созданием специальных станков и линий для одной или нескольких однотипных деталей. Однако необходимость в постоянном совершенствовании и частой смене моделей машин требует создания гибкого (универсального) оборудования, что трудно сочетается с высокой производительностью и концентрацией операций. Для разрешения этих противоречивых требований необходимо, чтобы автоматизированное оборудование обеспечивало возможность переналадки и перекомпоновки рабочих машин при достаточно высокой их производительности, сжатые сроки их проектирования и изготовления, невысокую стоимость и быструю окупаемость. В наибольшей степени этому удовлетворяет агрегатно-модульный метод создания оборудования, т. е. проектирование и компоновка различных станков, сборочных, сварочных, контрольно-сортировочных и других машин, средств управления ими, промышленных роботов, средств автоматизации из стандартных (унифицированных) узлов, каждый из которых предназначен для выполнения заранее определенных функций.

Агрегатированное оборудование сочетает в себе преимущества специальных и универсальных машин. Как специальные эти машины обеспечивают высокую производительность, а как универсальные их можно перекомпоновать и переналадить при необходимости перехода на изготовление нового вида продукции.

На рис. 2.1 показаны годовые затраты Z_j на групповую обработку десяти небольших корпусных деталей в зависимости от варианта технологического процесса при одних и тех же условиях обработки.

Первый вариант характеризуется применением одношпиндельных обрабатывающих центров (ОЦ) самой простой компоновки с магазинами инструментов для последовательной обработки поверхностей (рис. 2.2, а). Следующие варианты предусматривают одно- и многостороннюю обработку деталей на одно- и многшпиндельных станках, на ОЦ с магазинами инстру-

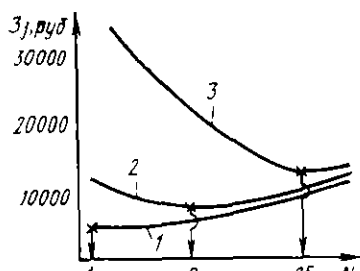


Рис. 2.1. Зависимость годовых приведенных затрат Z_j на обработку группы деталей от степени концентрации переходов на станках и суммарной программы выпуска ΣN_i (N — номер варианта):

1 — $N_T = 50\ 000$; 2 — $N_T = 130\ 000$; 3 — $N_T = 475\ 000$

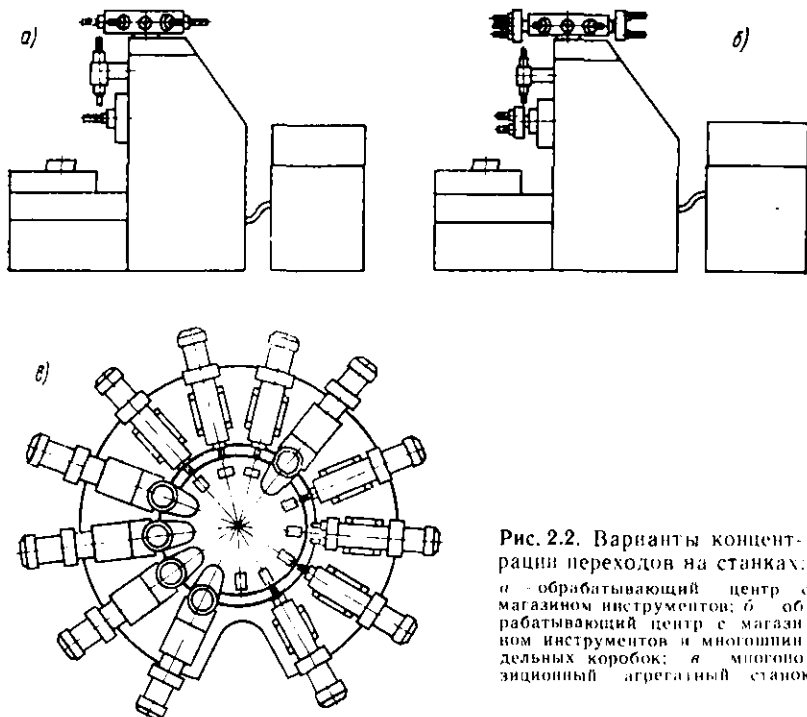


Рис. 2.2. Варианты концентрации переходов на станках:
 а - обрабатывающий центр с магазином инструментов; б - обрабатывающий центр с магазином инструментов и многошпиндельными коробками; в - многопозиционный агрегатный станок

ментов и сменных многошпиндельных коробок (рис. 2.2. б), на многопозиционных переналаживаемых станках, участках автоматических линий с обработкой деталей в спутниках, на станочной системе со сложной структурой (43-й вариант), состоящей из двух участков, на каждом из которых детали обрабатывают в нескольких параллельных потоках многопозиционных станков (рис. 2.2. в).

На одном из опытных производств для оценки влияния программы выпуска на выбор оптимального варианта расчеты вели для трех различных годовых программ N_r , отличающихся примерно в десять раз (кривые 1, 2, 3 на рис. 2.1). Как видно, для $N_r = 50\,000$ шт. наименьшие затраты Z , получены при использовании одношпиндельных ОЦ для обработки указанной группы корпусных деталей. Для $N_r =$

130 000 шт. наилучший вариант 8 — обработка на одно- и многошпиндельных ОЦ, т. е. вариант, характеризующийся более высокой концентрацией технологических переходов. Для $N_r = 475\,000$ шт. оптимальной оказалась станочная линия из двух многопозиционных переналаживаемых станков (25-й вариант). 43-й вариант применения сложной станочной системы мог бы быть эффективным при общей программе выпуска деталей в несколько миллионов штук в год.

Аналогичные примеры анализа различных вариантов обработки других групп деталей показывают, что для различных условий, раз-

ных программ выпуска существует свой вариант построения процесса и структурно-компоновочных схем станочного оборудования, соответствующий минимальному значению принятого критерия. Это же положение подтверждается данными расчетов, выполненных рядом зарубежных станкостроительных фирм. График (рис. 2.3), построенный фирмой ЭМАГ (ФРГ) для трех типов оборудования, свидетельствует о том, что в пределах рассматриваемой серийной обработки (от 1 до 10 000 шт.) двух различных деталей гибкие станочные ячейки 4 обеспечивают минимальные затраты на единицу продукции до серии в 6000 шт., по сравнению же с обработкой на отдельных неавтоматизированных станках 1 и 2 жестко заблокированные линии 3 имеют преимущество уже при серии, большей 4 000 шт.

Таким образом, для различных групп деталей при разных программах их выпуска существуют свои оптимальные варианты структуры процесса, которые не могут быть реализованы только на серийно выпускаемых станках, например на одношпиндельных ОЦ, получивших наибольшее применение при создании гибких участков и линий. Необходимо также станочное оборудование с ЧПУ, способное реализовать варианты технологических процессов с более высокой концентрацией технологических переходов, чем у одношпиндельных ОЦ, т. е. во многих случаях необходима не только многошпиндельная (многоинструментная), но и многопозиционная обработка на гибких автоматических линиях (ГАЛ) или переналаживаемых (ПАЛ) с накопителями деталей между позициями или без них.

Следовательно, при большом многообразии технологических задач обеспечить высокую экономическую эффективность обработки деталей можно только при одном условии, а именно при компоновке технологического оборудования для различных типов производства (от мелкосерийного до массового) из рационально ограниченных комплектов унифицированных узлов, т. е. по агрегатно-модульному принципу.

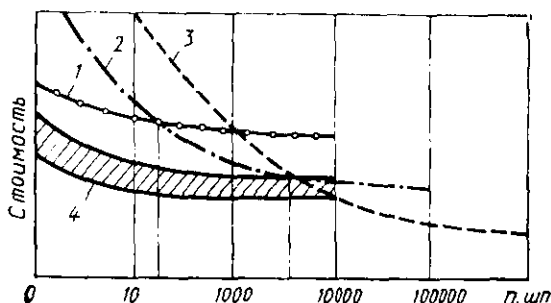


Рис. 2.3. Зависимость затрат на единицу продукции от величины партии обработки (C — стоимость одной детали; n — изготовленное количество деталей):

Применение агрегатно-модульного принципа создания станочного, сборочного и другого оборудования позволяет:

1) проектировать высокопроизводительные гибкие автоматические линии (ГАЛ) и гибкие автоматические участки (ГАУ) для реализации оптимальных технологических процессов, а не подгонять процессы под возможности уже имеющегося оборудования (например, ОЦ);

2) существенно сократить время и трудоемкость проектирования и изготовления АЛ, так как появляется возможность использования готовых агрегатов и модулей;

3) расширять производственные возможности модульной системы путем ее постоянного наращивания на ранее разработанной базе;

4) повышать надежность работы модульной системы в целом путем предварительной отработки конструкции модулей и наиболее полного их соответствия выполняемой технологической задаче;

5) улучшать условия эксплуатации и ремонтпригодность создаваемых модульных систем путем уменьшения разнообразия модулей и их элементов;

6) снижать стоимость модулей путем серийного и крупносерийного производства их унифицированных узлов и отдельных элементов.

На рис. 2.4 показаны общие виды унифицированных узлов и агрегатов (и их условные обозначения) для компоновки ГАЛ и ГАУ, а на рис. 2.5 — классификация структурных схем станочного оборудования с различной степенью концентрации K операций, скомпонованного из этих узлов.

Система классификации содержит все принципиально отличающиеся варианты структурных схем построения станочного оборудования. Варианты схем в зависимости от степени концентрации операций подразделены на три класса: KI — однопозиционные станки, позволяющие осуществлять первую степень концентрации операций (одно- и многосторонняя обработка деталей в данной позиции одним инструментом или несколькими последовательно, параллельно или параллельно-последовательно); KII — многопозиционные станки и автоматические линии с жесткой связью между позициями (вторая степень концентрации операций осуществляется при последовательном, параллельном или параллельно-последовательном объединении на станке или станочной линии ряда позиций); KIII — автоматические станочные системы из многопозиционных станков или участков линий с накопителями деталей (третья степень концентрации операций).

Таким образом, система классификации содержит варианты схем, широко используемых на практике, а также схемы, которые пока еще не нашли применения. Можно отметить, что чем правее и ниже расположена схема на рис. 2.5, тем более сложную структуру она характеризует. Кроме того, как следует из рис. 2.1 — 2.3, эффективно использовать гибкое оборудование со сложными структурными схемами можно при увеличении годовых программ выпуска деталей и уменьшении их номенклатуры, т. е. количества деталей, объединенных в груп-

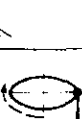
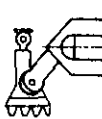
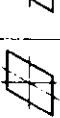
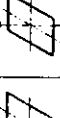
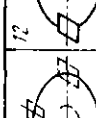
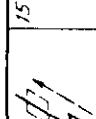
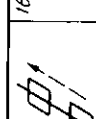
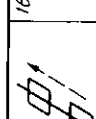
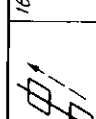
Силовые узлы							Робот	
1	2	3	4	5	6	7		
								
Общий вид	Общий вид	Общий вид	Общий вид	Общий вид	Общий вид	Общий вид		
Механизмы ориентации зажима и транспортировки обрабатываемых деталей								
8	9	10	11	12	13	14	15	16
								
Общий вид								
Схема	Схема	Схема	Схема	Схема	Схема	Схема	Схема	Схема

Рис. 2.4. Основные типы узлов ТСМ и их структурные схемы:

1 — одношпиндельный силовой узел; 2 — силовой узел с револьверной головкой; 3 — то же, с магазином инструментов и манипулятором для его зажима; 4 — силовой узел с многошпиндельной головкой; 5 — силовой узел с многошпиндельной револьверной головкой; 6 — то же, с магазином блоков инструментов и манипулятором для их зажима; 7 — робот; 8 — стационарное приспособление; 9 — перемещаемое приспособление; 10 — поворотное приспособление; 11 — поворотный стол для последовательного перемещения деталей; 12 — поворотный стол непрерывного вращения; 13 — поворотный стол для параллельно-последовательного перемещения деталей; 14 — праминный конвейер для последовательного перемещения деталей; 15 — конвейер (синхронный или асинхронный) для параллельно последовательного перемещения деталей; 16 — тележка с индуктивным управлением.

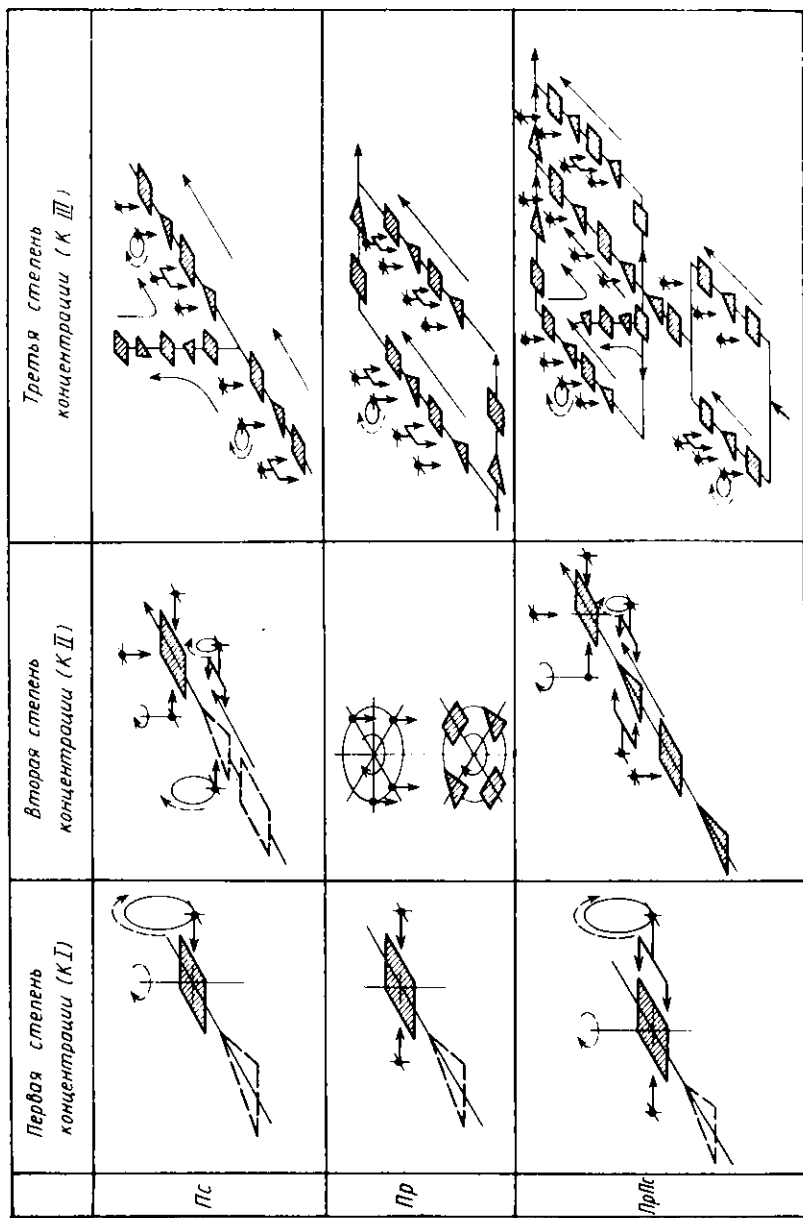


Рис. 2.5. Классификация структурных схем гибких модулей и ГАЛ по степени концентрации операций

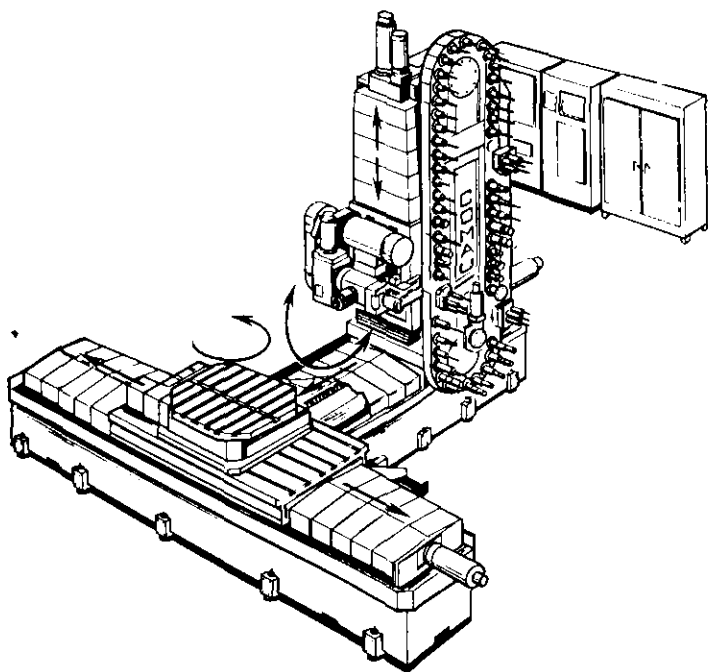


Рис. 2.6. Одношпиндельный ОЦ с магазином заменяемых инструментов

пу для обработки на данном оборудовании. Наиболее интересные примеры гибкого оборудования, иллюстрирующие предложенную на рис. 2.5 классификацию, показаны на рис. 2.6—2.10.

Рассмотрим несколько примеров использования агрегатно-модульного метода компоновки автоматизированного оборудования для обработки деталей и сборки изделий.

На рис. 2.6 и 2.7 представлены обрабатывающие центры «Комау» (Италия) для корпусных деталей. Первый соответствует структурной схеме КИПС и предназначен для последовательной обработки различных корпусных деталей. Его большие технологические возможности определяются не только использованием одного из стандартных инструментальных магазинов (емкость 40, 65 и 140 шт.), но и сочетанием перемещений с поворотами детали для обработки с необходимых сторон. Второй ОЦ (рис. 2.7) построен по структурной схеме КИПрПС, т. е. помимо одношпиндельной обработки (правый магазин) здесь возможна многшпиндельная обработка с помощью сменных многшпиндельных головок (левый инструментальный 12-позиционный магазин), причем рабочий шпиндель для одноинструментной обработки с помощью системы CNC может изменять положение своей оси в вертикальной плоскости в пределах 150° .

Необходимо отметить, что комбинации структурных схем встречаются не только при создании обрабатывающих модулей, но, как будет показано ниже, и при построении гибких систем.

Интересным примером модуля, построенного на агрегатном принципе, является сложный многокоординатный ОЦ фирмы «Хонсберг» (ФРГ), который может встраиваться как в линии, так и в гибкие ячейки из двух-трех обрабатывающих модулей. Особенностью его является возможность двух рабочих движений (по осям X и Z), применение двух инструментальных магазинов для одно- и многоинструментной обработки, а также устройства для подачи и смены инструментальных блоков, расположенного за магазинами, с перемещением последних по осям Y и Z .

Гибкая ячейка, имеющая структуру КИШРПс (рис. 2.8), состоит из двух таких модулей 1 и 2, каждый из которых снабжен своим набором инструментов и работает независимо от другого. Объединяет их порталный робот 3, обслуживающий оба модуля. Робототележки 4 доставляют на центральную площадку поддоны 5 с ориентированными

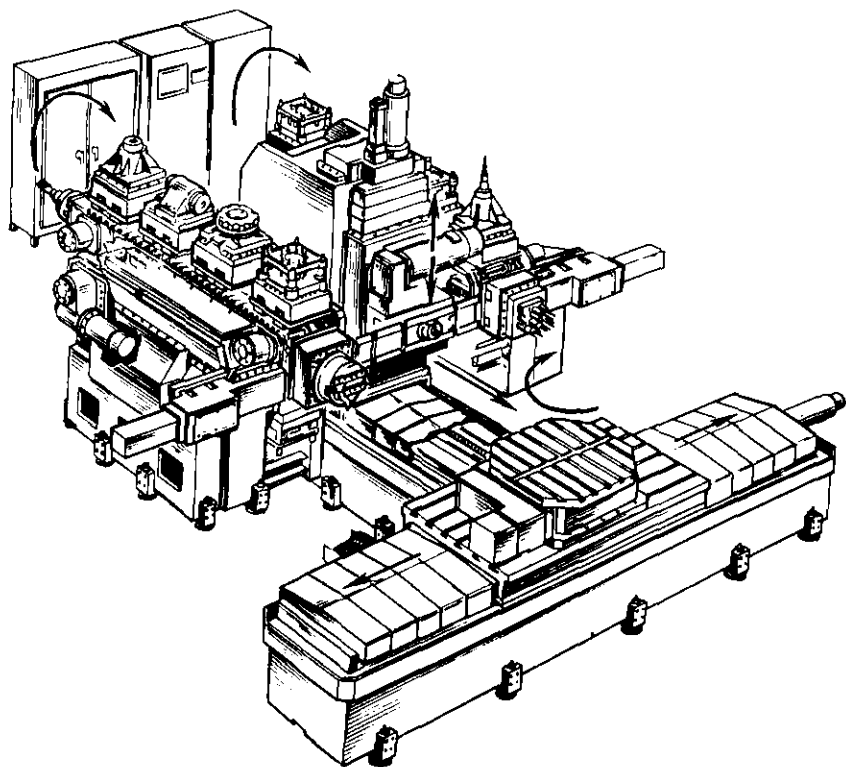


Рис. 2.7. Комбинированный ОЦ для одношпиндельной и многошпиндельной обработки

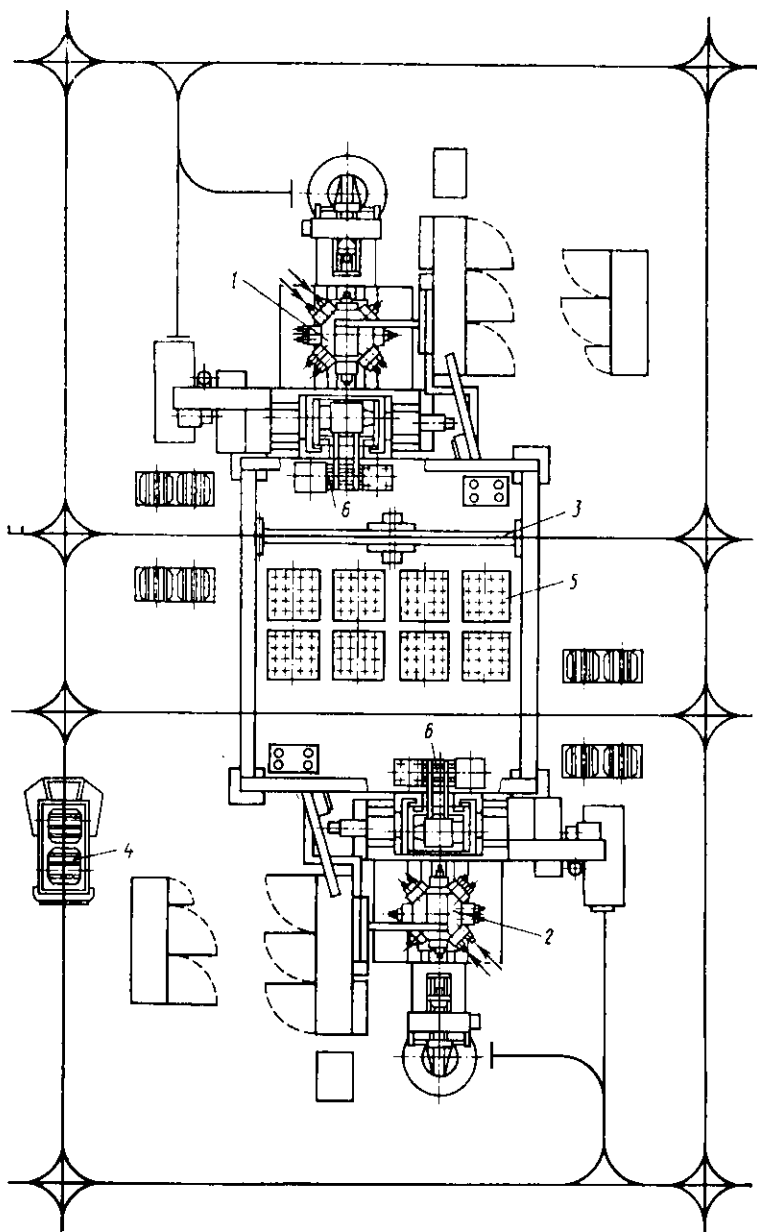


Рис. 2.8. Гибкая обрабатывающая ячейка из двух ОЦ и порталного грузочного робота

заготовками. Загрузка, базирование и крепление заготовок осуществляется в спутниках на трехпозиционных столах 6 во время обработки деталей. Доставку заготовок к станкам и вывоз деталей осуществляют робототележки. После завершения обработки спутник с деталями подается в среднюю позицию стола, после чего оба спутника смещаются направо, при этом заготовки в спутнике подаются в зону обработки, а готовые детали робот разгружает в поддон. Робототележки используются также для подачи инструментов и инструментальных блоков к автоматическим устройствам для их замены в магазинах и для удаления отходов. В шпиндели станков встроены датчики для контроля затупления режущего инструмента.

Представителем класса схем KIIIpIc является 50-позиционная ГАЛ (рис. 2.9) для обработки в спутниках 43 различных по конструкции крышек подшипников (щитов) автомобильных генераторов, имеющих одинаковые поверхности базирования. Время автоматической переналадки линии — 6–10 мин, цикл обработки деталей (заготовки литье под давлением из алюминиевого сплава) в среднем составляет 6 с, при непрерывной работе линия обеспечивает обработку 600 деталей в час. Инструменты заменяют два порталных робота. Каждый из них доставляет из магазина емкостью в 80 инструментов необходимый инструмент и заменяет его на силовой головке, заданной программой управления ГАЛ.

Наибольший интерес представляют созданные недавно многофункциональные гибкие станочные системы с комбинированной (переменной) структурой (пример показан на рис. 2.10). Гибкая автоматизированная линия (ГАЛ) имеет простую конструкцию, состоит из одно- и многошпиндельных станков с ЧПУ. Используемые модули и обладающая высокими возможностями управляющая система позволяют достигнуть оптимальной гибкости применительно к таким специфическим требованиям, как число заготовок, обрабатываемых в единицу времени, различный объем партий заготовок и различное время цикла обработки. В каждом случае используются наиболее рациональная структура технологического процесса и методы обработки деталей. Главное при этом — высокая производительность, характерная для агрегатных станков и автоматических линий. На одном уровне использования ГАЛ работает как гибкая станочная линия с рабочим тактом поточной линии. Этот уровень используется для обработки больших партий изделий с коротким временем обработки. Система работает в этом случае как обычная автоматическая линия. На другом уровне ГАЛ работает в гибком режиме загрузки модулей, используемых как отдельные станки. Этот рабочий уровень используется, когда обрабатывают мелкие партии заготовок и необходимо более продолжительное время их обработки. В этом случае, когда гибкие модули работают независимо друг от друга, при неисправности одного из модулей другие могут продолжать работу. Поточный метод обработки деталей не используется.

Гибкая система имеет следующие модули:

производственный модуль с четырьмя координатами типа NCF, с тремя координатами, реализованными в инструменте, а также с устройством для смены инструмента и инструментальным магазином;
 лоботокарный модуль, управляемый от ЧПУ;
 модуль с автоматической сменой сверильных головок с поворотным кронштейном, управляемый от ЧПУ.

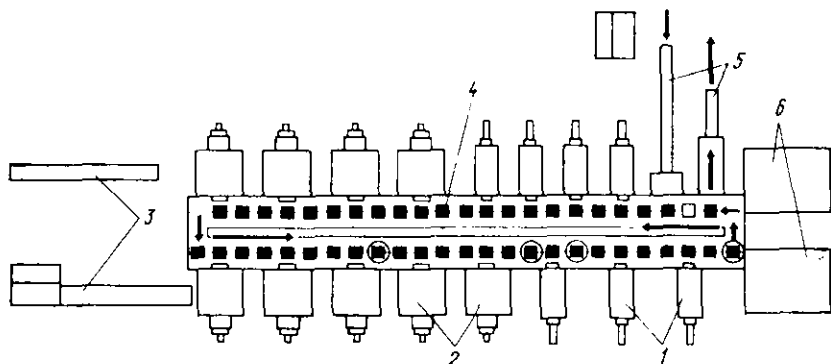


Рис. 2.9. Планировка гибкой автоматической линии для обработки 43 типов крышек автомобильных генераторов:

1 - однокоординатные силовые головки с ЧПУ (7 шт.); 2 - трехкоординатные силовые головки с ЧПУ (9 шт.); 3 - автооператоры для автоматической замены инструмента; 4 - спутник с деталями; 5 - станция установки заготовок и снятия готовых деталей; 6 - магазин с 80 заменяемыми инструментами.

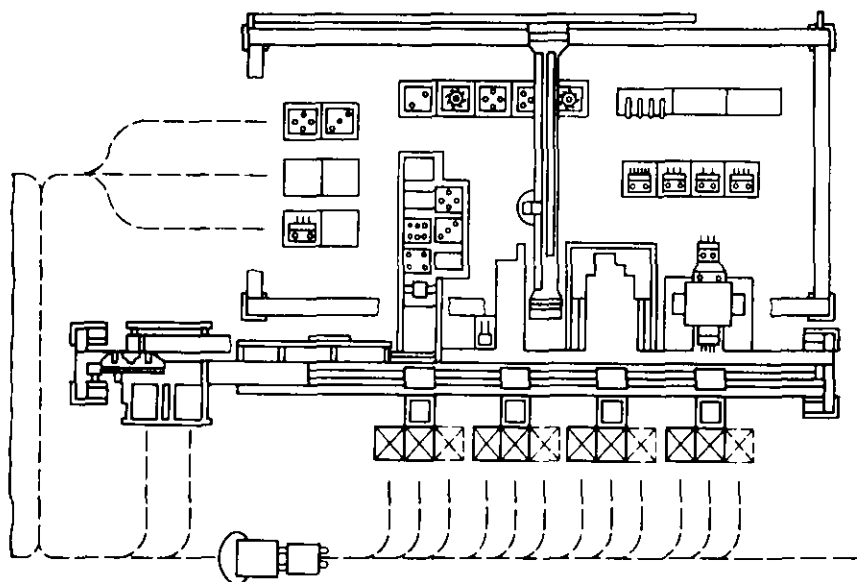


Рис. 2.10. Гибкая автоматическая линия с переменной структурой (планировка системы)

На планировке (рис. 2.10) в системе использовалось по одному модулю каждого типа, но их число может быть любым образом увеличено, т. е. возможно наращивание структуры линии.

Портальный робот, служащий для снабжения всей системы, оснащенный тремя руками с захватами и автоматической сменой захватов, предназначен для транспортировки спутников и заготовок. Индуктивная робототележка для транспортировки палет и спутников служит для загрузки всех передаточных позиций. В комплект входят система снабжения инструментом, автоматическая трехкоординатная измерительная позиция и моечная установка.

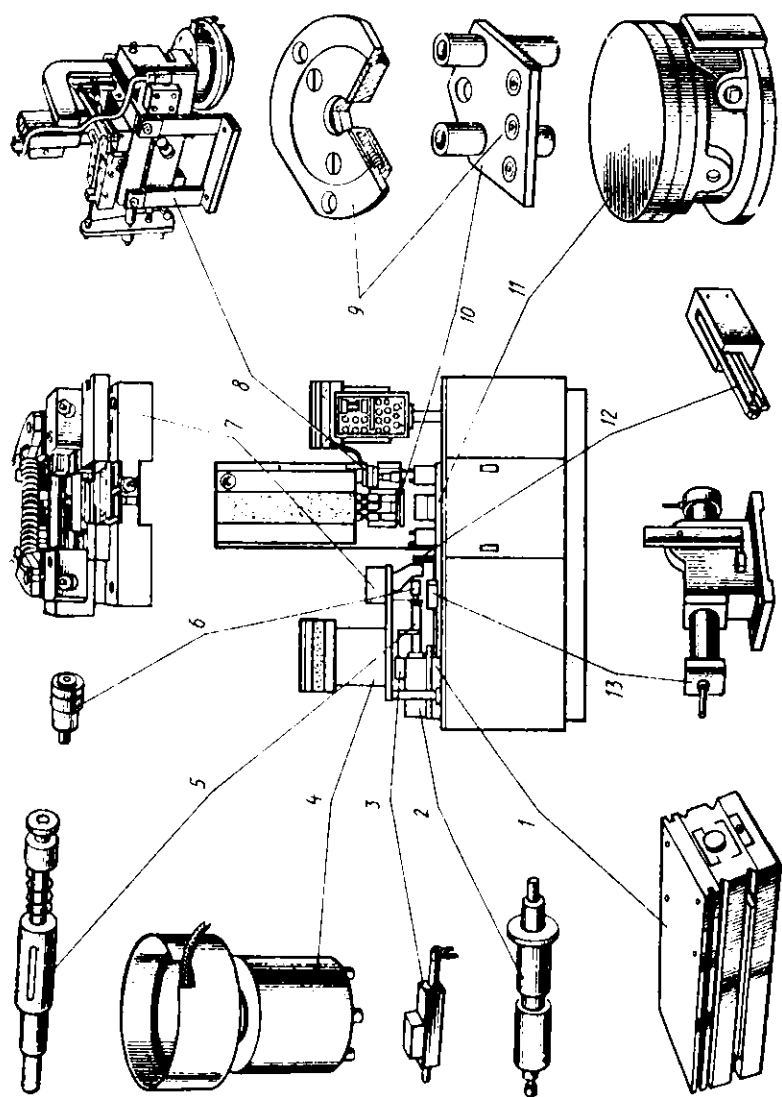
Управление гибкой системой осуществляется следующим образом. Внутри линий все функции управления, как-то: транспортировка палет и спутников, работа портального робота и смена захватов, транспортировка спутников, работа склада заготовок и транспортировка заготовок—выполняются системой управления высшего уровня с программой, хранящейся в памяти. Кроме того, робототележка для напольной транспортировки также получает команды от системы управления и дает подтверждение об их выполнении. Система управления включает функции выбора, которые определяют, какие заготовки, когда и где будут обрабатываться. Устройства снабжения спутниками и захватами управляются системой в зависимости от программы. Система подает сигналы пуска отдельным управляемым от ЧПУ модулям, после чего начинают обрабатываться соответствующие детали. После окончания обработки и возврата в исходное положение модули подают сигналы системе и запрашивают новые данные.

Управление многошпиндельными головками или инструментом производится внутри отдельных гибких модулей. На модуле с автоматической сменой сверлильных головок многошпиндельные головки управляются с помощью кодирования по месту. На модуле с инструментом работают посредством переменного кодирования по месту. Эти функции могут дополнительно переноситься в систему управления высшего уровня.

На экране центрального пульта управления системы можно вызвать следующую информацию: общий обзор установки, загруженность накопительных позиций для заготовок, сигнализацию неисправностей, данные о станке и координатах, программу накопителя заготовок, программу автоматического режима работы, вспомогательные функции, автоматический или ручной режим работы, функции захватов, зажимных устройств, транспортных устройств.

Расширить систему управления можно присоединением ЭВМ прямого числового программного управления DNC в целях применения и реализации различных стратегий, для чего предусмотрено соответствующее сопряжение с ЭВМ.

Таким образом, несмотря на ограниченное количество принципиальных структурных схем модулей и ГАЛ, ограниченность типов унифицированных узлов для их компоновки можно при использовании идеи агрегатирования создать очень много вариантов элементов ГАЛ и



гибких станочных систем в целом. Ряд примеров АЛ и ТСМ для обработки деталей массового машиностроительного производства, построенных по агрегатно-модульному принципу, приведен в [1].

Агрегатно-модульный метод создания сборочного оборудования предусматривает проектирование и компоновку его из унифицированных (или стандартных) элементов, предварительно изготовленных и прошедших всесторонние испытания, что не только ускоряет процесс внедрения такого оборудования (проектируются и изготавливаются только специальные устройства, необходимые для сборки заданных изделий), но повышает его надежность и снижает стоимость.

Типичный пример агрегатированного сборочного полуавтомата для завертывания резьбовых шпилек, спроектированного НИИТавтопромом из унифицированных узлов и устройств, показан на рис. 2.11. Создана гамма резьбозавертывающих станков. Один из них предназначен для сборки крышки распределительных шестерен со шпильками и имеет следующую техническую характеристику:

Время цикла, с	14
Крутящий момент, Н·м	20—60
Количество одновременно завертываемых шпилек	8
Размеры шпилек, мм	M8×18; M8×22; M8×40
Габаритные размеры, мм	2000×1390×1600
Масса, кг	2900

Крышка устанавливается и снимается вручную, шпильки подаются из вибробункеров, ориентируются по длине и шагу резьбы и с помощью пневмошпильковертов заворачиваются в крышку. Полуавтомат может быть перекомпонован для другого изделия. Применение такого оборудования позволило в полтора — три раза повысить производительность труда, обеспечить высокое качество сборки, надежность работы сборочных машин, улучшить условия труда рабочих-сборщиков.

Сборочные агрегатные машины проектируют как однопозиционные, так и с поворотными столами. Они предназначены для сравнительно несложных по конструкции изделий и выполнения всего лишь нескольких сборочных переходов. Для сборки изделий более сложных, состоящих из нескольких десятков деталей, проектируют сборочные линии с синхронным и несинхронным транспортом. Первоначально получили распространение синхронные жестко заблокированные линии, выполненные на базе шаговых конвейеров. В последние годы большее применение получают несинхронные линии (НСЛ) с гибкими связями

Рис. 2.11. Компоновка резьбозавертывающего полуавтомата из унифицированных элементов:

1 — стол силовой; 2 — пневмогайковерт; 3 — механизм выключения вращения шпинделя; 4 — вибробункер; 5 — шпиндель; 6 — патрон; 7 — механизм ориентации шпилек по шагу резьбы; 8 — механизм ориентации шпилек по длине резьбовых концов и шагу резьбы; 9 — кулачковый захват; 10 — механизм подачи захвата; 11 — стол поворотный; 12 — клещевой захват; 13 — механизм поворота захвата

между рабочими позициями. Как правило, такие линии состоят из отдельных (модульных) рабочих позиций, соединенных между собой замкнутым непрерывно движущимся цепным или ленточным транспортным устройством с «плавающими» приспособлениями-спутниками, на которых размещаются собираемые детали (рис. 2.12). Гибкая связь между приспособлением-спутником и тяговым органом, а также наличие свободного пространства между рабочими позициями позволяют создавать небольшие межоперационные заделы, обеспечивающие независимую (несинхронную) работу позиций линии.

Для межоперационных накопителей задела используются участки конвейера, расположенные в свободном пространстве между рабочими позициями. Так как такие зоны имеются в любых линиях и предназначены для ремонта и обслуживания оборудования, НСЛ по габаритным размерам практически не отличаются от аналогичных жестко заблокированных линий, хотя производительность их выше.

В промышленности применяют НСЛ с горизонтально-и вертикально замкнутыми конвейерами (рис. 2.13). В последних приспособления-спутники возвращаются на первую позицию конвейером возврата, расположенным под основным. Движущим элементом служат цепи или ленты, иногда приводные конвейеры и гравитационные лотки.

На НСЛ можно собрать изделия нескольких модификаций в произвольном порядке, организовать участки из дублирующих позиций без введения специальных «ветвящихся» транспортных систем; встроить дополнительные позиции, что позволит осуществить постепенный переход от ручной сборки к автоматической или увеличить производительность линии из-за дублирования лимитирующих позиций. НСЛ недороги в изготовлении и просты в монтаже, так как не требуют высокой точности соблюдения размеров, определяющих расположение отдельных позиций, а также исключают необходимость применения традиционных схем блокировок. Применение НСЛ улучшает условия труда, так как исключает непосредственную синхронизацию действий рабочего с тактом работы механизмов, тем самым снижая утомляемость и нервное напряжение оператора, вызванное опасением не выполнить комплекс операций за отведенное время. Однако основным достоинством НСЛ является более высокая производительность (на 15—30 % выше, чем у жестко заблокированных линий). На сборочных линиях с шаговым конвейером собираемое изделие перемещается с позиции на позицию только после окончания всех операций на каждой позиции и задержка во времени выполнения операций на одной позиции ведет к задержке работы на всей линии. Возникновение таких задержек связано с отказами механизмов на позициях автоматической сборки и рассеянием времени выполнения операций ручной сборки.

Перемещение собираемого изделия между позициями на НСЛ осуществляется сразу после выполнения определенной операции, независимо от степени готовности операций на других позициях, а ритм работы достигается с помощью межоперационных заделов. При остановке или задержке работы на какой-либо позиции на остальных ра-

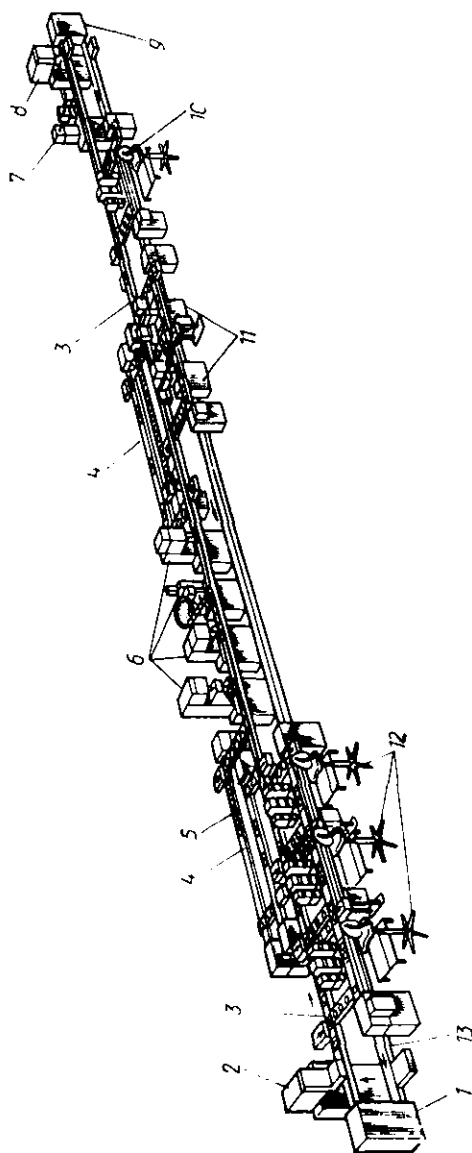
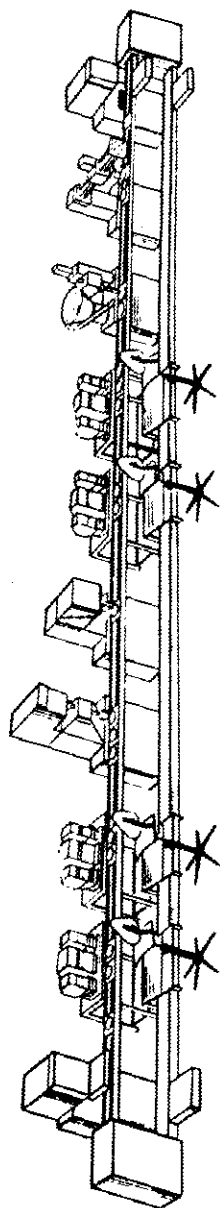


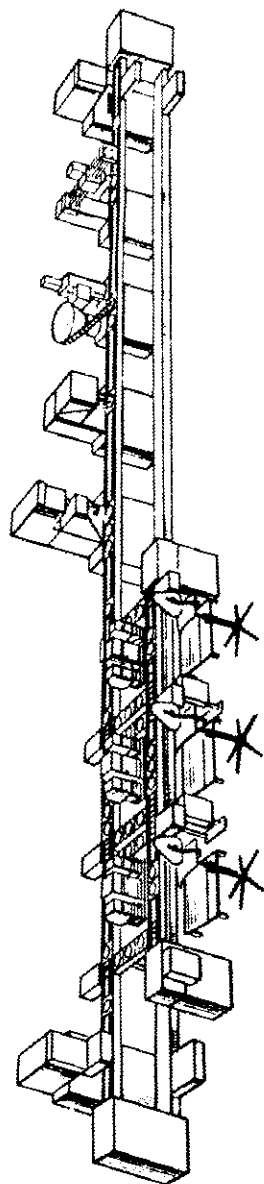
Рис. 2.12. Несинхронная сборочная линия:

1 — станция натяжения ленты; 2 — устройство подъема спутников; 3 — конвейер сборки изделий; 4 — накопители собираемых изделий; 5, 6 — автоматические сборочные позиции; 7 — передаточная станция; 8 — устройство опускания спутников; 9 — приводная станция; 10 — рабочее место для устранения дефектов сборки и контроля качества; 11 — контрольные автоматы; 12 — рабочие места ручной сборки изделий; 13 — конвейер возврата

a)



a)



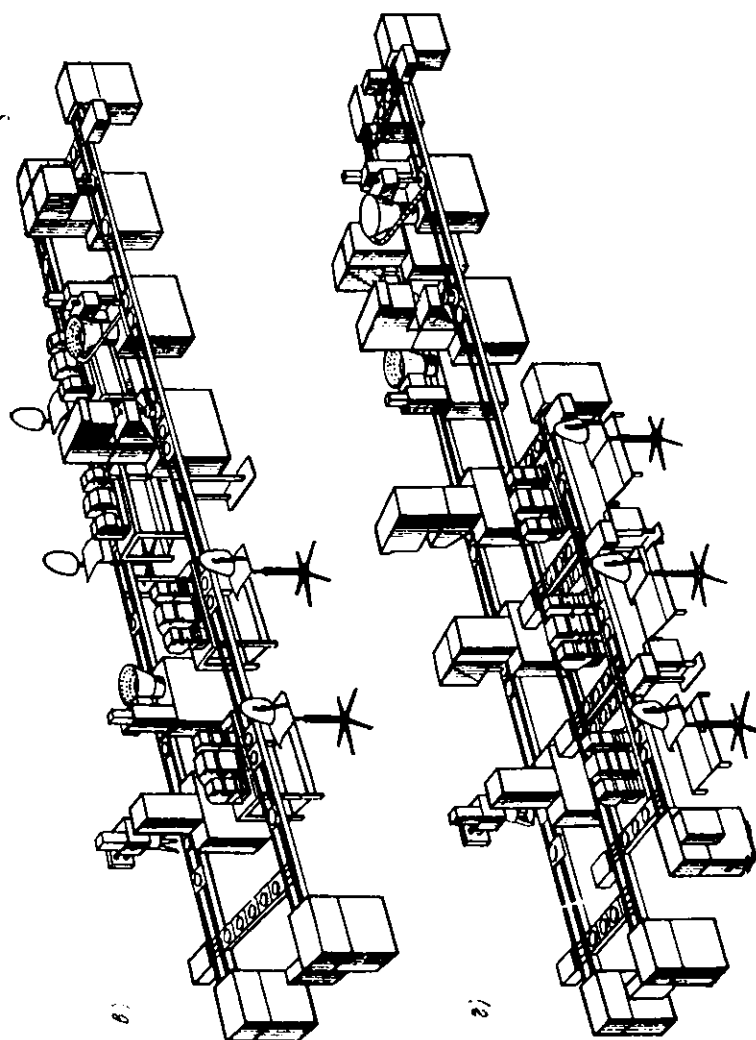


Рис. 2.13. Типы компоновок несинхронных сборочных линий фирмы «Бох» (ФРГ):
 а — с конвейером, замкнутым в вертикальной плоскости; б — с вертикально замкнутым конвейером и вынесенными позициями ручной сборки; в, г — с горизонтально замкнутым конвейером и вынесенными позициями ручной сборки

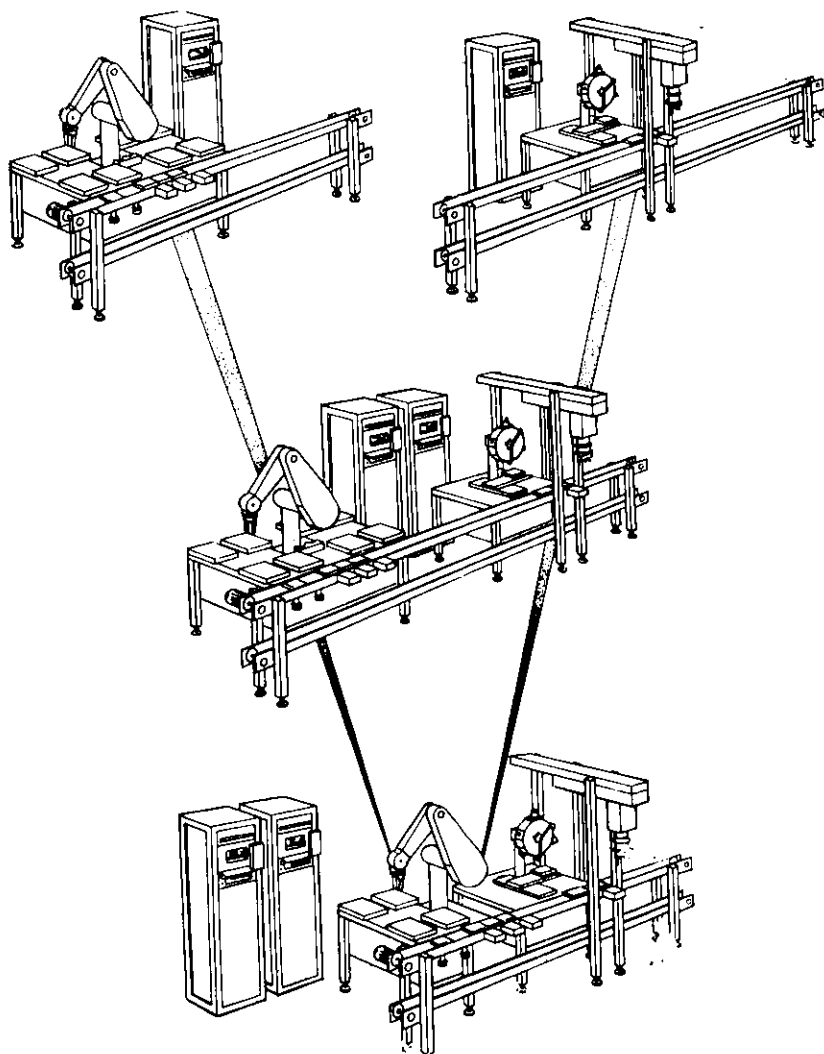


Рис. 2.14. Компоненты сборочных центров, встраиваемых в гибкие системы

бота продолжается еще некоторый промежуток времени (до истечения запасов в предыдущем накопителе или до заполнения последующего). Такое сборочное оборудование предназначено для одного изделия или нескольких однотипных, но компоновка его позиций из унифицированных элементов позволяет быстро перестраивать линии на изделия другой номенклатуры. Область применения такого оборудования — массовое и крупносерийное производство.

В серийном и мелкосерийном производстве получают распространение гибкие автоматические переналаживаемые линии, а также отдельные сборочные модули, где основными технологическими агрегатами служат сборочные роботы. Сборочные центры фирмы «Нокиа» (Финляндия), созданные совместно с предприятиями нашей страны и встраиваемые в линию (рис. 2.14), могут работать и автономно. Они предназначены для изделий с массой до 1 кг и габаритными размерами не более $120 \times 100 \times 100$ мм с общим количеством деталей до 10 шт. Сборочные центры выполняют следующие функции: прием, распознавание и фиксацию спутников, перемещаемых по конвейеру; установку в спутники предварительно ориентированных базовых деталей изделия; установку и закрепление собираемых деталей; нанесение смазок, склеивание; контроль действующих сил и моментов при закреплении деталей; запоминание результатов; расфиксацию и сьем спутников с контролем качества сборки и сортировкой изделий.

Робот имеет напольное и подвесное исполнение, шесть степеней подвижности, сервопривод постоянного тока. Точность позиционирования его $\pm 0,1$ мм, грузоподъемность — 2,5 кг, масса — 54 кг. Сборочные головки с электромеханическим приводом имеют шесть гнезд для инструментов, осевое усилие до 1000 Н и крутящий момент до 7 Н·м, продолжительность смены инструмента — 2,5 с. Головки могут перемещаться вертикально на 140 мм для выполнения сборочного пере-

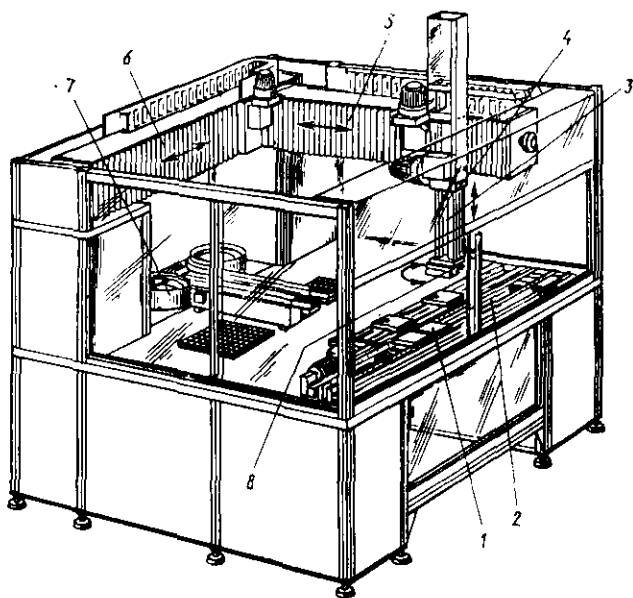


Рис. 2.15. Сборочный центр на базе робота, перемещаемого по трем осям координат

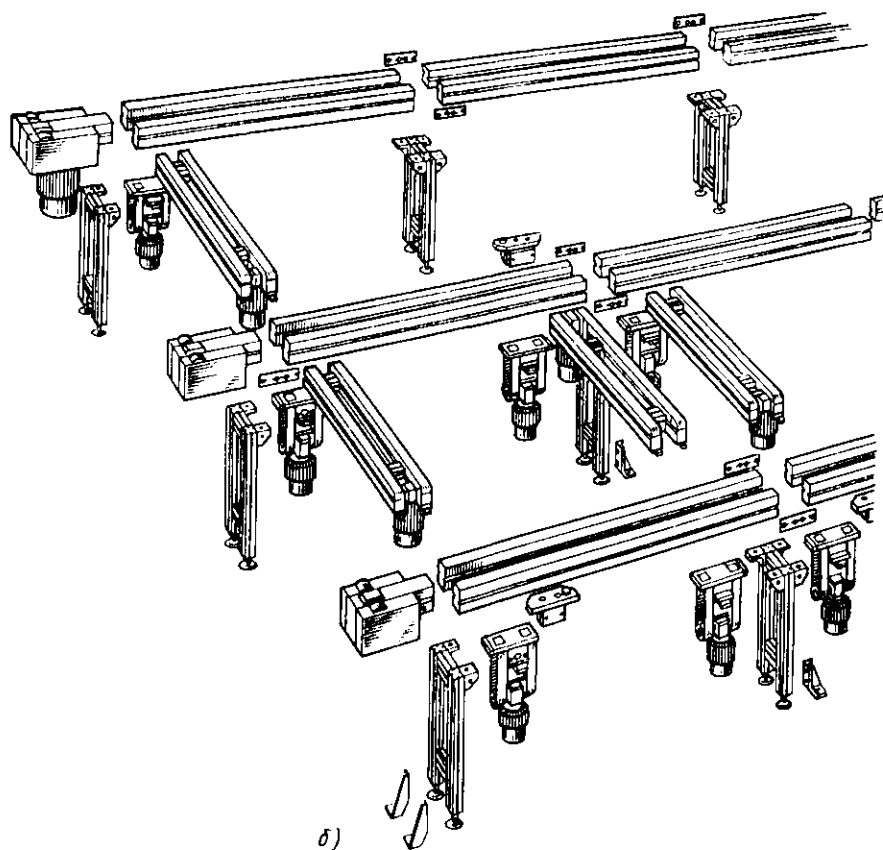
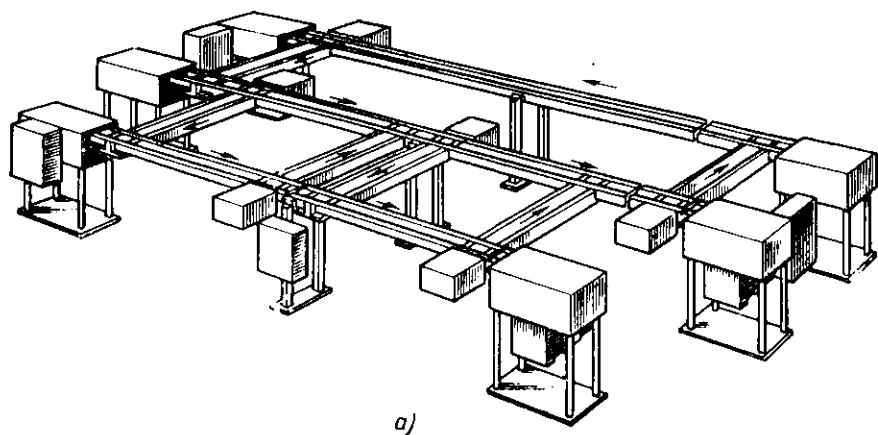


Рис. 2.16. Элементы, используемые при компоновке основания конструкций сборочных линий и центров:
 а — НСЛ с ветвящимся потоком изделий; б — унифицированные детали

хода со скоростью 10—60 мм/с, частота вращения инструментов 0—850 об/мин, погрешность позиционирования $\pm 0,5$ мм.

Система управления выполнена на базе «Электроники 60», исполнение — двухуровневое, язык программирования — ARPS.

Сборочные центры другой компоновки, разработанные фирмой «Бош» (ФРГ), показаны на рис. 2.15. Спутники 1 с базовой деталью подаются конвейером 2. Установку сопрягаемых деталей, подаваемых вибробункерами 7, осуществляет робот 3, имеющий механизмы 4, 5, 6 прямолинейного перемещения по трем координатам и ротационный блок 8 для поворота. Центр руки робота, поворачивающейся на 360° , может оснащаться элементами технического зрения и другими датчиками для распознавания положения деталей, контроля за их поступлением на сборку, а также контроля размеров сопрягаемых деталей. Благодаря широким возможностям робота и системы управления сборочный центр легко перепрограммируется на сборку различных изделий. На рис. 2.14 показана сборочная ячейка на основе сборочных центров, предназначенная для последовательной гибкой сборки сложных изделий.

Из унифицированных элементов могут агрегатироваться не только линии, но и механизированные рабочие места сборщиков. В условиях мелкосерийного производства такое решение, использующее достижения эргономики, требующее минимальных капиталовложений и существенно облегчающее труд сборщиков, в ряде случаев наиболее экономично. На рис. 2.16 показаны элементы оснований сборочных линий и модулей, которые, в свою очередь, собираются из унифицированных деталей.

Глава 3

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Как отмечалось, современное массовое и крупносерийное производство характеризуется постоянным ростом выпуска продукции, повышением требований к ее качеству, все более частой сменяемостью конструкций машин и приборов, высокими требованиями к экономической эффективности производства. Все это возможно обеспечить лишь при широком развитии научных исследований в области автоматизации массового производства, при формировании фундаментальных теоретических основ автоматизации процессов машиностроения, при опережающей подготовке инженерных кадров в области автоматизации. Кратко остановимся на наиболее важных направлениях развития теории проектирования АЛ и ТСМ для массового и крупносерийного механосборочного производства.

Таблица 3.1. Теоретические основы проектирования технологических систем

Создание теоретических основ проектирования, испытаний, эксплуатации и исследования АЛ		Разработка руководящих и нормативно-технических документов	Внедрение в АЛ проектных новаций по показателям производительности
Теория надежности АЛ	Теория структурного анализа АЛ	Проектирование и расчет АЛ	Расчеты показателей качества
Теория оптимальной концентрации операций техпроцессов АЛ	Теория ритмичности выпуска продукции АЛ	Приемо-сдаточные испытания АЛ	Имитационное моделирование на ЭВМ
Теория комплексной оптимизации структурно-компоновочных решений АЛ	Теория расчета и выбора параметров целевых механизмов АЛ	Эксплуатация АЛ	Расчеты и выбор параметров целевых механизмов и устройств
Научно-методические основы исследований работоспособности и испытаний АЛ	Теория рациональной эксплуатации АЛ	Исследование АЛ	Расчеты для оценки уровня и аттестации работоспо

Развитие теоретических исследований в этой области обеспечивает глубокие качественные изменения в производительных силах, служит научно-теоретической основой создания современных автоматически действующих средств производства, резко повышающих производительность труда и качество продукции. Особую значимость имеет разработка теории автоматизации для автоматических линий как наиболее сложных и дорогих систем машин. Они выпускаются в большом количестве (в СССР более 1000 АЛ в год). В то же время во всей мировой практике АЛ являются объектами единичного производства, создаются по разовым заказам.

Для каждого изделия при заданных требованиях к количеству и качеству продукции может быть разработано большое количество вариантов построения АЛ, отличающихся методами и маршрутами обработки, контроля и сборки, степенью дифференциации и концентрации операций технологического процесса, типами транспортно-загрузочных систем, числом параллельных потоков обработки и сборки, видом межагрегатных и межучастковых связей, конструктивными ре-

практику СКБ расчетов и обоснованием качества, и надежности	Внедрение в практику СКБ АЛ приемо-сдаточных испытаний		Внедрение в практику СКБ АЛ системной связи «Проектирование — эксплуатация — последующее проектирование»	
Расчеты производительности и надежности	Испытания целевых механизмов у изготовителя	Испытания оборудования АЛ у изготовителя	Организация исследований работоспособности АЛ	
Оптимизационные расчеты АЛ	Испытания АЛ у изготовителя	Испытания АЛ у заказчика	Расчеты резервов производительности	Формирование исходных данных для последующего проектирования АЛ и целевых механизмов
Расчеты и выбор эксплуатационных параметров	Доработка АЛ	Корректировка технической документации	Оценка производственного потенциала действующих АЛ	Организация рациональной эксплуатации АЛ
ки технического АЛ по показателям способности	Уточнение показателей работоспособности в ТУ на поставку АЛ			

шениями основных и вспомогательных механизмов и устройств, принципами построения систем управления. Процессы функционирования АЛ, особенно многопоточных и многоучастковых, весьма сложны, они характеризуются случайными отказами и описываются вероятностными закономерностями.

Технический уровень и эффективность АЛ определяются такими показателями, как качество изделий, производительность АЛ и надежность, ритмичность выдачи продукции. Именно с учетом этих критериев качества, производительности, надежности должны решаться такие задачи, как выбор типа и количества технологического оборудования, межоперационных накопителей заделов, их вместимости и мест их расположения, числа обслуживающих операторов и наладчиков, режимов резания, скорости транспортирования изделий и т.п.

Для создания высокоэффективных АЛ* необходимо было:

* Подробнее см.: Волчков Л. И., Дашенко А. И. Оптимальное проектирование технологических систем машин. М., 1989.

создать и реализовать на единой научно-методической основе систему расчетов и обоснований технологических и технических решений по показателям качества изделий, производительности и надежности на всех этапах проектирования и эксплуатации АЛ (табл. 3.1);

организовать и методически отработать систему приемо-сдаточных испытаний;

разработать систему рациональной эксплуатации АЛ с обеспечением контроля эксплуатационных показателей;

реализовать на единой методической и организационной основе регламентированную обратную связь от проектирования и эксплуатации АЛ к последующему проектированию.

Эти задачи не могли быть решены без глубоких научных исследований и обобщений, без развития теории автоматизации, а именно без создания научных основ проектирования, испытаний и эксплуатации АЛ, наконец, без тесной увязки теоретических разработок с практикой ведущих станкостроительных организаций.

Определяющий вклад в развитие теории проектирования автоматических линий внесли советские ученые и специалисты. Среди них в первую очередь должны быть отмечены основополагающие работы И. И. Артоболевского, А. П. Владзневского, Л. И. Волчкевича, Ф. С. Демьянюка, Н. М. Султан-Заде, Г. А. Шаумяна, Ю. Б. Эрпшера и др., результаты которых нашли широкое применение в практике ведущих КБ страны, проектирующих автоматизированное оборудование.

Был создан ряд новых направлений в теории проектирования АЛ и ТСМ: теория надежности АЛ; теория структурного анализа АЛ и синтеза с количественным описанием причинных связей и закономерностей функционирования, включая моделирование работы АЛ на ЭВМ; теория оптимальной концентрации технологических операций; теория ритмичности работы АЛ. Разработаны математические модели взаимосвязи показателей производительности, надежности, экономической эффективности АЛ с их технологическими, конструктивными, конструктивными и эксплуатационными параметрами.

§ 3.1. РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ И МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА АЛ

Разработка теории надежности как основы функционирования АЛ, рассматриваемых в качестве сложных многокомпонентных систем с количественным описанием причинных связей и закономерностей, является важнейшим направлением автоматизации производства. Математической основой теории явились математические модели взаимосвязи показателей производительности, надежности, экономической эффективности АЛ с их технологическими, конструктивными, конструктивными и эксплуатационными параметрами. При этом применялись как аналитические методы, так и имитационное моделирование на ЭВМ процессов функционирования АЛ во времени.

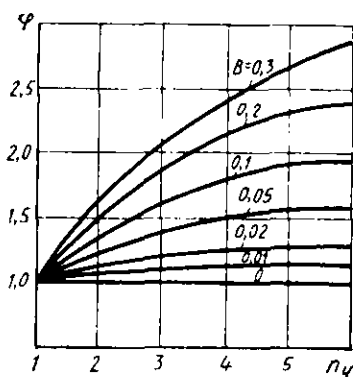


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента повышения производительности φ линии от числа n_y участков, на которые она разделена

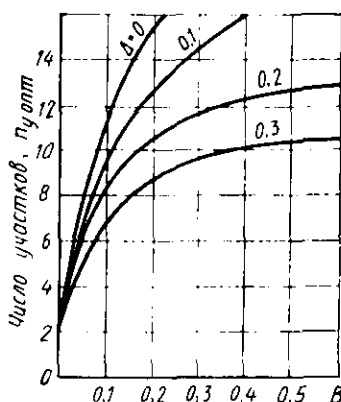


Рис. 3.2. Влияние удельной длительности восстановления B линии на оптимальное число участков $n_{y, \text{опт}}$

Исследования показали, что математические зависимости производительности многоучастковых АЛ от важнейших определяющих параметров — длительности рабочего цикла, надежности составляющих компонентов и числа участков-секций, на которое разделена линия, — являются нелинейными. Чем больше число участков и межоперационных накопителей заделов, тем выше производительность АЛ при прочих равных условиях, однако зависимость эта носит асимптотический характер, добавление каждого нового накопителя дает убывающий дополнительный прирост производительности. При этом относительный рост производительности тем выше, чем ниже показатели надежности встраиваемого в АЛ оборудования, механизмов и устройств. Полученные количественные данные иллюстрированы на рис. 3.1, где показаны графики зависимости роста коэффициента производительности φ АЛ от числа участков (n_y) и внецикловых потерь времени B (собственные простои на единицу времени безотказной работы станков). Существует экономически оптимальное и рассчитываемое количественно число участков, так как при структурном усложнении линий дополнительные капиталовложения растут пропорционально числу участков и накопителей (за счет стоимости самих накопителей, транспортной системы и системы управления). Число участков зависит от стоимости основного оборудования и накопителей, их надежности в работе, степени компенсации накопителями не совпадающих во времени простоев соседних участков из-за случайных отказов в работе. Диаграмма рис. 3.2, рассчитанная для типовых условий линии из 16 станков, показывает, что лишь при высокой надежности и малых внецикловых потерях ($B = 0,02 \dots 0,04$) целесообразно создавать подобные линии с жесткой межагрегатной связью, одноучастковыми. При этом уровень не компенсируемых накопителями потерь (из-за ограниченной

вместимости накопителей) практически не влияет на производительность. Чем выше потери и ниже надежность, тем на большее число участков-секций необходимо разделить АЛ, вплоть до вариантов с гибкой межагрегатной связью (число участков равно числу станков в АЛ). Степень компенсации потерь при этом возрастает.

Особенно сложен расчет производительности и надежности несинхронных сборочных линий (НСЛ). Работа их характеризуется не только гибкой связью между всеми автоматическими рабочими позициями (сборочными агрегатами), но и рассеиванием времени выполнения операций на оставшихся позициях ручной сборки.

Выявление и анализ вероятностных закономерностей функционирования НСЛ позволили разработать их математические модели, которые составили основу алгоритмов имитационного моделирования. Широкомасштабное моделирование нескольких тысяч сборочных линий с различными структурными схемами и параметрами надежности станков (сборочных позиций) обеспечило разработанные графоаналитические методы расчета необходимыми статистическими данными.

На ранних стадиях проектирования стало возможным рассчитать надежность как станочных, так и сборочных линий с самой сложной структурой, по известным показателям надежности составляющих элементов этих линий.

Погрешность расчета коэффициента технического использования, по данным производственных исследований, не превышает 0,5—1,5 %.

Таким образом, на основе данных теоретических исследований стало возможным достоверно сравнивать различные варианты структурно-компоновочных схем станочных и сборочных линий с целью выбора наиболее эффективного варианта по одному или одновременно по нескольким технико-экономическим критериям.

Аналогично разработаны методы и математические модели для оценки влияния параметров надежности АЛ на их экономическую эффективность. С увеличением интенсивности отказов встроенного в АЛ оборудования производительность его снижается по экспоненциальному закону и при некоторых значениях оказывается ниже производительности поточной линии ($\varphi \leq 1$). Одновременно растут длительность и трудоемкость устранения отказов, а следовательно, необходимая численность наладчиков, что уменьшает общую экономию трудовых затрат при обслуживании. При высокой интенсивности отказов и номинальном сокращении численности персонала в два раза ($e_{II} = 2$) реальное количество рабочих на АЛ оказывается таким же и даже большим, чем на поточной линии. Сокращение двух важнейших источников эффективности автоматизации (φ , e) приводит к тому, что у номинально высокоэффективных АЛ с ухудшением показателей надежности сроки окупаемости интенсивно растут, а линии становятся убыточными.

Кратко рассмотренные здесь положения позволили разработать (Л. И. Волчкевич) теорию и методы расчета допусков на надежность для станков, механизмов и устройств, встраиваемых в АЛ. Для этого

разработана система математических уравнений, последовательно связывающая показатели надежности механизмов и устройств, показатели надежности станков и участков, показатели надежности АЛ, в том числе ее производительность и стоимость, оптимальное число наладчиков, себестоимость эксплуатации, приведенные затраты на годовой выпуск продукции. При этом выходной параметр каждого уравнения является входным параметром последующего. Идея расчета заключается в том, что задаются допустимые значения показателей экономической эффективности, после чего вся система уравнений «реверсирует», т. е. решается в обратном порядке, вплоть до расчета допустимых показателей надежности механизмов и устройств.

Аналогичным образом разработаны вопросы теории производительности и надежности гибких, переналаживаемых автоматизированных производственных систем, получены математические модели взаимосвязи производительности с параметрами длительности основных и вспомогательных операций, безотказности в работе, с длительностью переналадок, размерами партий обработки и т.д.

§ 3.2. РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ АЛ

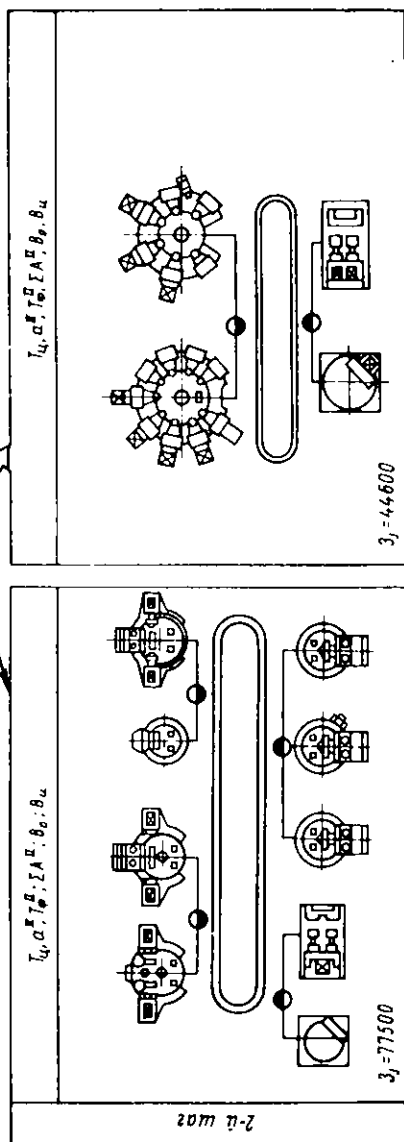
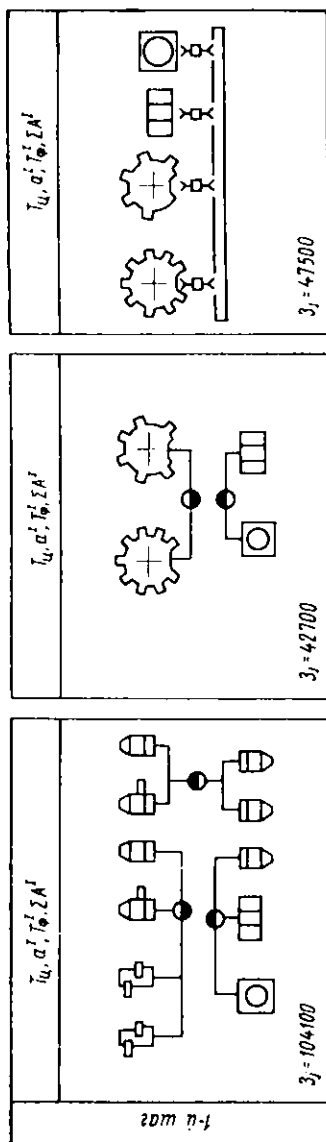
Одна из важнейших задач начального этапа проектирования АЛ— это выбор наилучшего по тому или иному критерию варианта технологического процесса и структурно-компоновочной схемы построения линии, т. е. оптимального конструктивно-технологического решения. Так как на основе только интуиции и практического опыта проектант не всегда может разработать наиболее эффективный вариант процесса и компоновки линии, возникает необходимость создания теоретических основ оптимального проектирования АЛ, т.е. научно обоснованных методов, которые позволили бы по заданным исходным данным формировать общую совокупность технически возможных вариантов, проводить их сравнительный анализ и отбор вплоть до выделения оптимального варианта.

Наиболее ответственным этапом проектирования АЛ являются техническое задание и техническое предложение, когда по заданным техническим требованиям качества и количества обрабатываемых деталей или сборки изделий и условиям экономического оптимума должен быть разработан технологический процесс и выбран структурно-компоновочный вариант построения системы как основы всего дальнейшего процесса проектирования.

При проектировании оптимальных технологических процессов решаются следующие конструктивно-технологические задачи:

выбор рационального метода получения заготовок;

выбор методов обработки поверхностей деталей и сборки изделий, обеспечивающих заданный уровень производительности, точности и качества обработанной детали и изделий;



разработка технологических схем и компоновок оборудования с оптимальной концентрацией элементарных переходов (с оптимальной структурой технологических процессов);

оптимизация режимов резания с учетом выбранных способов (планов) замены инструментов, числа наладчиков, обслуживающих станки;

разработка компоновки линии или автоматического участка с обоснованием методов транспортирования деталей, автоматизации их загрузки, контроля качества, с выбором объема и мест расположения накопителей деталей, палет или приспособлений-спутников, системы управления линией.

Сложность научно обоснованного решения перечисленных задач определяется большой вариантностью процессов обработки деталей и сборки изделия, которые можно характеризовать методами обработки поверхностей и структурой (степенью концентрации операций). Совершенствование методов обработки и сборки позволяет в ряде случаев в несколько раз повысить эффективность той операции, на которой они применяются, изменение же структуры процесса в несколько десятков раз изменяет показатели эффективности процесса в целом.

На практике выбор структуры процесса и схем станочных систем осуществляется в большинстве случаев путем сравнения двух-трех вариантов, разработанных главным образом на основе личного опыта и интуиции проектанта. При этом оптимальный вариант может оказаться вне рассмотрения.

Для решения этой важной технологической задачи разработан метод оптимального многопараметрического синтеза технологических систем машин механосборочного производства (см. гл. 4). Синтез основывается на анализе составляющих элементов и систем в целом, на генерировании вариантов технологического процесса и схем построения АЛ, на поиске наилучших решений без полного перебора всех возможных для данных условий.

Разработанный метод синтеза схем построения станочных и сборочных линий позволяет при минимальном числе исходных данных найти необходимую совокупность технически целесообразных вариантов технологического процесса и структурно-компоновочных схем АЛ и путем их направленного отбора с использованием ЭВМ (в режиме диалога или автопоиска) выбрать тот, который обеспечивает заданное чертежом качество деталей (изделий) и программу их выпуска с наилучшими экономическими показателями.

Рис. 3.3 и 3.4 иллюстрируют пошаговый метод направленного поиска оптимального варианта технологического процесса обработки корпусной детали и сборки изделия. При использовании этого метода оптимальный вариант обычно находят на третьем шаге решения задачи, при этом генерируется и оценивается 5—7 вариантов из нескольких десятков или сотен возможных. На каждом шаге область поиска сужается, а варианты прорабатываются все более подробно, оценка и срав-

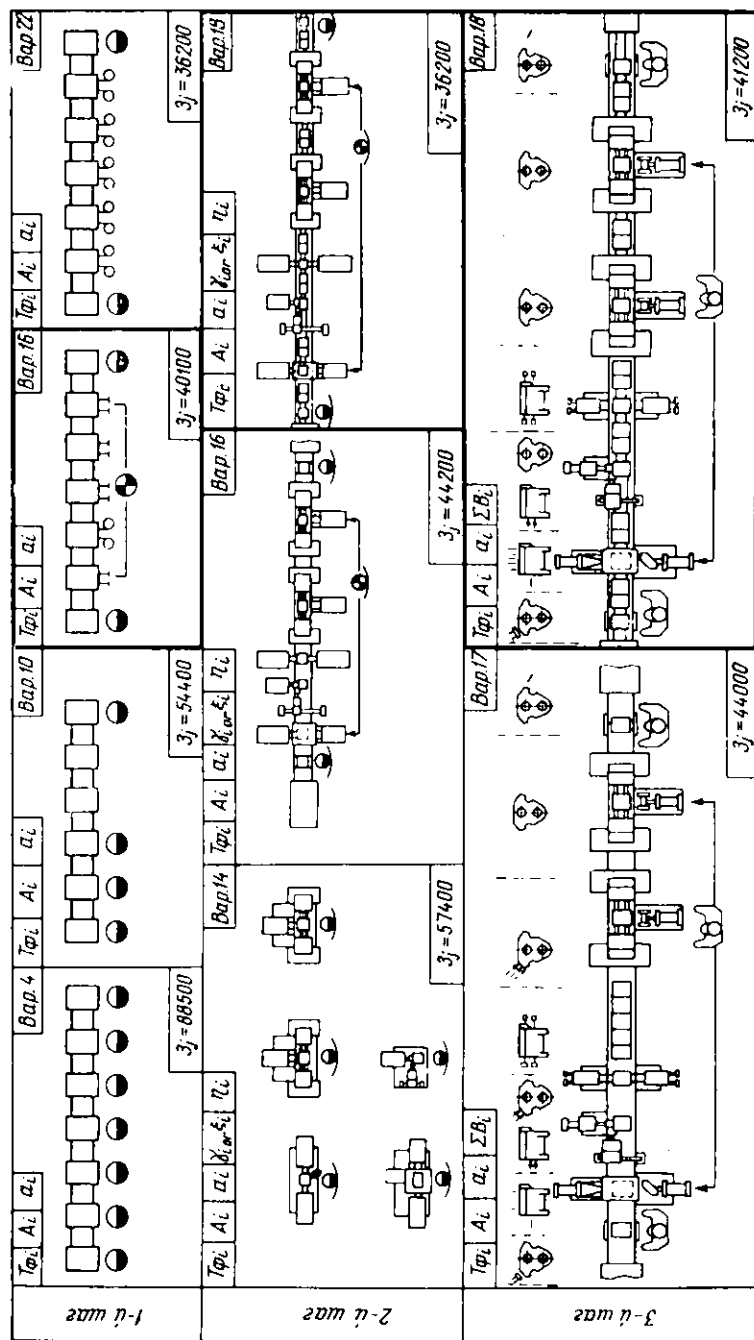


Рис. 3.4. Схема поиска оптимальной компоновки сборочной линии

нение их ведутся по все большему числу параметров (см. рис. 3.3 и 3.4) на основе математических моделей, которые связывают эти параметры с экономическим критерием оценки — приведенными затратами Z_j . В случае необходимости применяют метод многокритериальных оценок.

Метод направленного поиска основан на анализе минимально необходимого числа вариантов технологического процесса и структурно-компоновочных схем оборудования, необходимо подробно прорабатывать лишь два-три варианта на последнем шаге оптимизации, т. е. обеспечивается наименьшая трудоемкость разработки и обоснования технического предложения АЛ. Использование метода дает возможность накапливать и обобщать опыт предыдущих решений, создавать отраслевые банки данных и информационно-поисковые системы оптимальных вариантов технологии и построения автоматизированного оборудования для типовых деталей и изделий машиностроения. На всех этапах оптимизации оценка производительности и надежности генерируемых вариантов компоновок станочного и сборочного оборудования ведется на основе упомянутых выше методов расчета.

При создании теоретических основ проектирования сборочных линий особое внимание уделяется развитию методов отработки конструкций собираемых изделий на технологичность, а также разработке принципиально новых методов выполнения сборочных операций, с использованием различных физических эффектов (пневмовихревые методы, ориентация в электромагнитном поле, вибросборка, нагрев и охлаждение деталей, лазерная сварка и т.д.).

§ 3.3. РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ И УСТРОЙСТВ АЛ

В последние годы выполнены обширные теоретические и экспериментальные исследования по сравнительному анализу узлов и механизмов станочных и сборочных линий, разработаны методы расчета типажа, оптимальных технологических и конструктивных параметров, определены области наиболее эффективного применения силовых узлов и транспортных устройств, загрузочных, ориентирующих, подающих механизмов, средств автоматического контроля для станочных и сборочных линий. Разработаны методы повышения их надежности и долговечности, быстродействия и точности, улучшения динамических характеристик, снижения стоимости. Во многом такие расчеты и обоснования разработаны применительно к новым конструкциям.

Первостепенное внимание уделялось проблемам оптимизации типажа и технологических параметров узлов механосборочного оборудования, так как несоответствие этих параметров требованиям конкретных технологических процессов увеличивает габаритные размеры, массу, занимаемую площадь и стоимость линий, не позволяет реализовать оптимальный технологический процесс, т. е. в конечном счете снижает технико-экономическую эффективность автоматизации.

С помощью теоретических методов технико-экономического расчета параметрических рядов решают экстремальные задачи оптимизации на основе функций спроса, полученных статистическим путем. Основная идея методов состоит в том, что множеству M требований в изделиях с параметром X_i ($i = 1, 2, \dots, M$) противопоставляется ограниченное множество K изделий с предлагаемым параметром (типоразмером) N_i ($i = 1, 2, \dots, K$), при этом $K \leq M$. Это неравенство выражает противоположные интересы изготовителей и потребителей данных средств автоматизации. Из-за несоответствия предложений требованиям имеют место потери (дополнительные затраты) как в сфере производства изделий, так и в сфере их эксплуатации, что учитывалось при оптимизации.

В процессе поиска компромиссных решений принимались такие варианты типоразмеров узлов и такие величины их параметров, которые обеспечивали решение народнохозяйственной задачи (обработку изделий отрасли) с минимальными суммарными затратами. При решении практических задач анализировались действующие и перспективные технологические процессы изготовления изделий-представителей на заводах основных отраслей машиностроения (автомобильной и др.), с использованием методов полного перебора и адаптивных алгоритмов оптимизации выбирались параметрические ряды узлов.

Таким образом, эта часть исследований создала необходимые условия для агрегатно-модульного построения станочного и сборочного оборудования АЛ, что резко сокращает сроки проектирования и изготовления оборудования, повышает надежность, снижает стоимость, позволяет в каждом конкретном случае реализовать оптимальный технологический процесс.

§ 3.4. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЛ

Изучение использования АЛ в промышленности показало, что условия их нормального функционирования обеспечиваются при эксплуатации далеко не всегда. Структурно-конструктивные решения, уровень надежности и качества обработки, заложенные на основании теоретических исследований в проект АЛ, и качество изготовления оборудования позволяют реализовать только часть производственных возможностей линии, однако фактическая производительность и качество обработки в значительной степени зависят от условий эксплуатации. Как правило, в процессе функционирования АЛ требования к производительности оборудования и качеству выпускаемой продукции, затраты на эксплуатацию и уровень производства (качество заготовок и инструментов, квалификация обслуживающего персонала и т.п.) не остаются постоянными. Поэтому обеспечение проектных показателей АЛ в производственных условиях, создание рациональной системы их эксплуатации — важная научная проблема.

Вследствие статистической природы характеристик АЛ, а также конечной длительности прямо-сдаточных испытаний, проектанты ли-

нии обычно закладывают резервы по производительности и главным параметрам точности обработки, тем самым компенсируя влияния неучтенных факторов. Это приводит к увеличению капитальных затрат, которые не всегда реализуются при эксплуатации.

Для создания рациональной системы эксплуатации АЛ в ЭНИМСе проф., д-ром техн. наук Б. И. Черпаковым разработана теория производственного потенциала, позволившая создать ряд научно обоснованных методик. *Производственный потенциал* — это количество продукции заданного качества, которое может выпустить АЛ в единицу времени при фиксированных затратах на мероприятия для реализации новых технических и организационных требований производства.

Производственный потенциал конкретной АЛ определяется аналитически, методом имитационного моделирования или устанавливается путем проведения и обобщения результатов эксплуатационных исследований. В том случае, когда характеристики производственного потенциала АЛ выше (равны) требований производства, решается задача построения оптимальной системы ее эксплуатации: выбирается оптимальный набор организационно-технических мероприятий для достижения производственного потенциала на АЛ при ограничениях на материальные затраты, связанные с внедрением этих мероприятий. Приближение фактических показателей АЛ к ее производственному потенциалу осуществляется путем внедрения указанных мероприятий (регламентированного технического обслуживания и планового ремонта, технической диагностики и др.).

Достижение производственного потенциала становится возможным благодаря разработке и реализации на ЭВМ модели функционирования АЛ, учитывающей условия ее эксплуатации. Функционирование АЛ рассматривается как взаимодействие ряда регламентированных и нерегламентированных потоков заготовок, инструментов и др. В модели предусмотрена возможность имитации раздельного возникновения отказов оборудования и инструментов, а также оценка работы бригады наладчиков, занятых устранением отказов и выполняющих регламентированное техническое обслуживание.

Моделирование функционирования АЛ при внедрении мероприятий позволяет оценить: потенциальную производительность и ритмичность работы, оптимальную вместимость накопителей и места их установки на линии, оптимальную численность обслуживающего персонала и количество параллельно работающего оборудования, целесообразный уровень регламентации технического обслуживания и ряд других параметров.

В результате комплекса научно-исследовательских работ создается рациональная система эксплуатации, полностью обеспечивающая требования производства. В соответствии с этим разработаны оптимальная структура ремонтного цикла АЛ и регламентация технического обслуживания, методы контроля работоспособности по параметру длительности рабочего цикла и т.д.

Особое внимание уделено эффективной эксплуатации режущих инструментов на АЛ. Трудность решения проблемы состоит в том, что вследствие значительного рассеивания стойкости режущих инструментов замена их на основе средних значений стойкости с настройкой счетчиков циклов на эту величину себя не оправдала. Задачу необходимо решать на основе анализа законов распределения стойкости с выбором оптимальных периодов замен инструментов на основе технико-экономических расчетов [10].

Для определения законов распределения стойкости инструментов АЛ и в процессе хронометражных исследований линий многократно фиксировалась стойкость одних и тех же инструментов в условиях замены их по отказам. На рис. 3.5. показаны экспериментальные кривые распределения стойкости, выраженной в относительных единицах. Как видно, характер кривых идентичен, что дает возможность использовать один теоретический закон распределения для их аппроксимации. На основе статистической обработки нескольких сотен таких распределений сделан вывод о возможности использования распределений Вейбулла для характеристики стойкости как случайной величины.

Это хорошо подтверждают графики (рис. 3.6), где сопоставлены теоретическая и экспериментальная (регрессионная) зависимости параметра распределения Вейбулла « b » от коэффициента вариации стойкости v_s . На основе графика и приведенной там же зависимости можно по значению коэффициента вариации стойкости инструментов прогнозировать форму кривой распределения на стадии проектирования АЛ.

Разработан метод расчета оптимальных периодов замен инструментов на основе использования законов распределения стойкости, который применяется как на стадии проектирования АЛ, так и на стадии их эксплуатации.

Показанные на рис. 3.7 зависимости параметра экономической эффективности линий $\pi(T)$ от периодов замен инструментов T_i для трех типов кривых распределения стойкости T (близких к экспоненциальному, $b = 1$; Рэлея, $b = 2$ и Гаусса, $b = 3$) и параметров, данных в табл. 3.2, свидетельствуют о том, что экономические потери от неправильно выбранных периодов принудительных замен будут тем больше, чем больше показатель степени b и чем больше разница во времени между принудительной заменой и заменой по отказам инструментов. Расчеты позволили не только сократить расходы на инструмент, но и сократить простой АЛ из-за их замены.

При разработке комплексной системы обеспечения технического уровня АЛ большое внимание уделяется качеству продукции (КП).

Обработка заготовок со стабильным по величине припуском и однородными физико-механическими свойствами, использование в АЛ станков с высокой жесткостью и геометрической точностью, применение высококачественного инструмента, контрольных автоматов и автоподналадчиков, рациональная система обслуживания и ремонта оборудования — все эти факторы позволяют в условиях массового

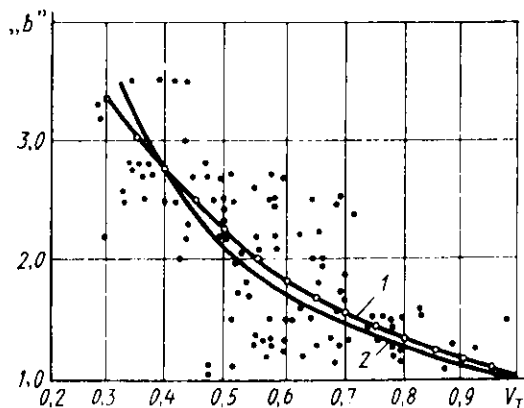
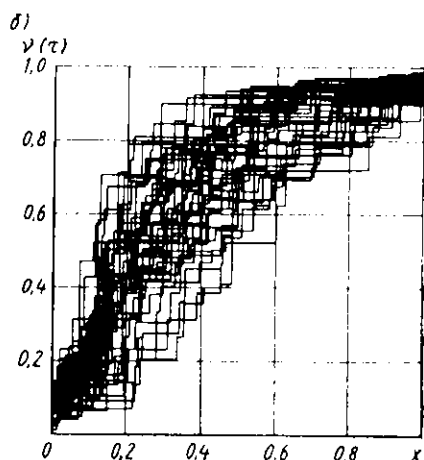
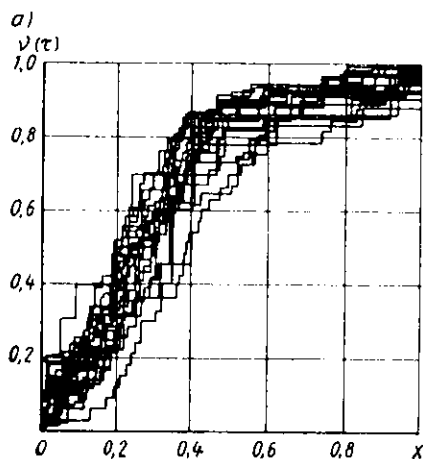


Рис. 3.5. Распределение стойкости режущих инструментов А.Т.: экспериментальные (а, б) для сверл и резцов соответственно

Рис. 3.6. Зависимость показателя «b» распределения Вейбулла от коэффициента вариации стойкости V_T :

1 — экспериментальная регрессионная зависимость $b = 4,18 V_T^{-2} - 8,67 V_T + 5,56$; 2 — теоретическая кривая

производства обеспечить обработку точных деталей в течение длительного времени. Вместе с тем изменение перечисленных факторов в течение периода эксплуатации, а также необходимость выбора наиболее рациональных программ (планов) воздействия на технологический процесс при снижении точности обработки выдвигают задачу создания автоматизированных систем управления точностью обработки деталей (АСУ ТОД) и качеством продукции на АЛ [1].

Наиболее сложно определить причину снижения точности обработки. В этом случае целесообразно применять современные математические методы и вычислительную технику, т. е. обеспечить стабильность технологических процессов и повысить качество продукции в производственных условиях на основе управления процессами с применением современных математических методов и ЭВМ.

Построение математической модели технологического процесса и исследование ее дают возможность целенаправленно воздействовать на

Таблица 3.2. Исходные данные для расчета

Параметры	Значения		
	1	2	3
$\lambda = \bar{v}_2 / \bar{v}_1$	0,50	0,75	1,0
$\alpha_{от} = \bar{A}_{от} \bar{A}_p$	0,20	0,10	0,02
$\alpha_{пр} = \bar{A}_{пр} \bar{A}_p$	0,20	0,10	0,02
B	0,82	0,33	0,05
q	1,0	0,2	0,02

процесс обработки, а экономическая оценка результатов воздействия позволяет осуществлять оптимальное управление процессом. Необходимость оптимального управления в условиях стохастического характера производства, когда на выходные параметры процесса оказывает влияния большое число факторов (основная часть которых изменяется с течением времени), обуславливает разработку и внедрение АСУ ТОД и качества продукции (КП), в первую очередь для массового производства. Задачи таких систем следующие: сбор и анализ информации о действительных значениях факторов технологического процесса, определяющих качество продукции, обработка экспериментальных данных и оценка степени влияния каждого фактора, построение статисти-

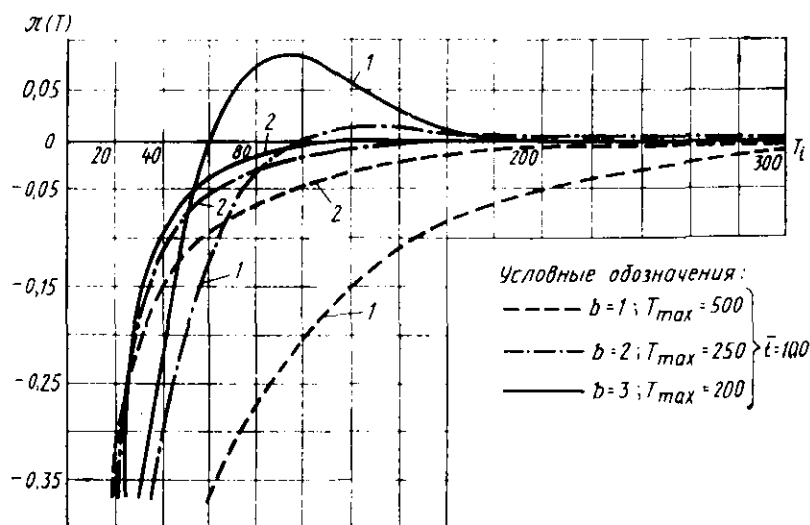


Рис. 3.7. Расчет оптимальных периодов замен режущих инструментов

ческой модели операций обработки, экономическое сравнение различных вариантов управляющих воздействий, выбор оптимального плана управления, обеспечивающего заданное качество обработки при минимальных стоимостных затратах.

Для эффективного управления технологическими процессами с использованием ЭВМ необходимо располагать подробной информацией о том, какие факторы влияют на суммарную погрешность обработки, какова сила их влияния. При этом рекомендуется использовать математический аппарат, действие которого основано на применении дисперсионного анализа и теории планирования эксперимента. Это позволяет после предварительного обследования операций (для выбора факторов, которые могут оказывать влияние на суммарную погрешность обработки) и выполнения минимально необходимого числа измерений (позволяющих установить связь между значениями каждого фактора и величиной суммарной погрешности) количественно определить степень влияния факторов и их взаимодействий на выходные параметры детали.

По результатам небольшого числа измерений (например, 8 измерений для 3 факторов, 32 измерения для 5 факторов) ЭВМ расчетным путем устанавливает главные причины, которые могут привести к уменьшению точности обработки, и вычисляет коэффициенты регрессионного уравнения, представляющего собой математическую модель анализируемой операции.

На первоначальных этапах внедрения АСУ ТОД измерение значений параметров можно осуществлять стандартными приборами. Однако для широкого применения метода необходима разработка комплекса датчиков, измерительных устройств, передвижных стендов для диагностики технологического процесса, позволяющих автоматизировать операции сбора исходной информации.

Применение программируемых контроллеров и мини-ЭВМ для управления работой технологического оборудования на заводах массового производства позволяет автоматизировать передачу и обработку первичной информации, а также передачу управляющей информации от ЭВМ к станочным линиям, т. е. создается техническая возможность разработки автоматизированной системы управления качеством продукции, которая рассматривается как часть АСУП завода.

В условиях функционирования АСУ ТОД для обеспечения заданной точности обработки деталей применительно к процессам изготовления наиболее ответственных деталей или изделий необходимо:

- проводить последовательный анализ результатов выполнения операций (от последних, завершающих, к первоначальным) с целью выявления тех операций, на которых может появиться брак;

- выполнять технологический анализ выбранных операций для установления факторов, которые могут оказывать влияние на суммарную погрешность обработки детали;

- составлять план эксперимента в зависимости от числа факторов и числа уровней их измерения;

измерять с помощью датчиков состояния технологического процесса (или диагностических станций) числовые значения выделенных факторов и соответствующие им значения погрешности обработки детали;

передавать информацию в ЭВМ, проводить дисперсионный анализ технологической операции, определять доминирующие факторы и степень их влияния на погрешность детали;

в случае, когда доминирует один фактор, выдавать информацию соответствующим службам завода о необходимости воздействия на технологический процесс;

в случае, когда доминирует несколько факторов и значимы их взаимодействия, проводить расчет коэффициентов регрессионного уравнения, характеризующего математическую модель операции, и анализ модели в зависимости от изменения с целью определения комплекса мероприятий, обеспечивающих заданную точность обработки с минимальными затратами, т. е. разработку оптимального плана управления технологическим процессом.

На основе разработанных моделей взаимосвязи показателей работоспособности АЛ созданы научно-методические основы и математическое обеспечение приемо-сдаточных испытаний и анализа производительности и надежности действующих АЛ в условиях эксплуатации. Разработан математический аппарат, описывающий функционирование АЛ в условиях индивидуальных и бригадных методов обслуживания, наладки и ремонта. Он послужил основой теории рациональной системы эксплуатации АЛ, включая вопросы расчета и выбора численности и состава обслуживающего персонала, структур и длительности ремонтного цикла АЛ, диагностики состояния и т.п.

Глава 4

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ВЫБОРА СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ СИСТЕМ МАШИН

§ 4.1. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ МАШИН

Проектирование технологичных конструкций деталей и узлов машин — одно из важнейших направлений в технологии машиностроения, научные основы которого только начинают формироваться. Сущность его — в создании таких конструкций, которые в наибольшей степени приспособлены к условиям автоматической обработки деталей и сборки изделий. Разработаны эмпирические приемы и правила, позволяющие повысить технологичность конструкций, разрабатываются аналитические методы оценки технологичности, создаются от-

раслевые руководящие документы и ГОСТы. Не будем останавливаться в данной книге подробно на изложении проблем, методов их решения и правил, применяемых в различных отраслях машиностроения в СССР и за рубежом. Этому вопросу посвящена специальная техническая литература, в том числе справочная. Остановимся лишь на некоторых основных правилах, обобщенных применительно к сборочным единицам *:

изделие должно компоноваться по возможности из стандартных и унифицированных составных частей;

уникальные составные части по возможности не должны объединяться с унифицированными в единый узел, чтобы не нарушалась унификация последних;

изделие должно разъединяться на самостоятельные сборочные единицы. Сборочная единица является самостоятельной, если она кинематически связана и допускает независимую сборку, контроль и испытание;

компоновка изделия должна исключать промежуточную разборку и повторную сборку его составных частей;

изделие должно содержать базовую составную часть (деталь, узел), являющуюся основой для установки остальных узлов и деталей;

конструкция изделия должна обеспечивать сборку без изменения положения базовой составной части;

каждая составная часть изделия должна иметь минимальное число поверхностей и мест сопряжения с другими частями;

плоскости разъемов изделия по возможности должны быть перпендикулярны оси симметрии изделия;

степень взаимозаменяемости сопрягаемых поверхностей должна исключать необходимость в механической обработке и пригоночных работах при сборке;

не следует объединять в узел составные части с разными характеристиками износа (быстроизнашиваемые узлы следует выделять в отдельную группу);

конструкция элементов коммуникаций энергоцепей и линий связи должна допускать их автономное испытание и контроль;

конструкция изделия не должна иметь многозвенных размерных цепей;

число деталей в изделии должно быть минимальным;

изделие должно обладать устойчивостью и способностью к штабелированию;

как отдельные узлы, так и вся сборочная единица в целом должны быть кинематически замкнутыми;

простая вставка цилиндрического вала в отверстие с фаской;

* См.: *Щукин В. М.* Проектирование изделий в соответствии с требованиями автоматической сборки. М., ВНИИТЭМР (обзорная информация), 1985, с. 68.

вставка цилиндрического вала в отверстие с последующим поворотом;

вставка нескольких валов одновременно в несколько отверстий; вставка с боковой фиксацией (штифтование, шплинтование); завинчивание винтов;

вставка детали с усилием;

ввод и удаление позиционируемой оснастки (проставок, оправок и т.п.).

При кантовании детали (узла) необходимо:

обеспечение временного базирования;

соединение тонкостенного материала пластическим деформированием с образованием зацепляющихся гофров;

удаление приспособлений для временного базирования, сварка или пайка.

Там же разработаны рекомендации применительно к конструкциям деталей:

детали, отвечающие по геометрическим и физико-механическим свойствам условиям бункерования, не должны сцепляться, слипаться, вставляться и т.п. образом соединяться друг с другом;

форма деталей должна способствовать экономии пространства при их штабелировании и укладке в магазины;

детали должны иметь максимально возможное число осей и плоскостей симметрии;

если асимметрии деталей избежать не удастся, они должны быть упрочнены;

форма деталей должна быть удобной для перемещения их в лотках;

конструкция деталей должна обеспечивать установку их в изделие без использования вспомогательной оснастки (проставок, оправок) и по возможности исключить необходимость в кантовании их перед присоединением, т. е. детали должны ориентироваться соответствующим образом, для чего конструктору следует знать средства и способы автоматического ориентирования деталей (см., например, справочник «Сборка и монтаж изделий машиностроения». М., 1983);

прочность деталей должна обеспечивать их штабелирование и автоматическое манипулирование. Все хрупкие, слипающиеся, цепляющиеся и легко деформируемые детали должны устанавливаться вручную; гибкие элементы деталей должны заменяться на жесткие или упругие;

детали должны иметь четкую базовую поверхность для сборки; следует стремиться к совмещению конструкторской, измерительной и сборочной баз;

детали должны иметь поверхности, облегчающие их захват роботом. Детали одного изделия по возможности должны быть приспособлены для манипулирования одним и тем же захватным устройством. материал захватной поверхности должен соответствовать способу захвата (например, при захвате магнитом);

конструкция деталей должна обеспечивать максимальное сокращение длины хода при сопряжении их с ранее установленной деталью; при необходимости многократного центрирования конструкция деталей должна при их установке обеспечивать надежное центрирование по всем поверхностям;

конструкция деталей должна обеспечивать максимально возможное снижение требований к точности обработки и качеству сопрягаемых поверхностей;

для фиксации сопрягаемых деталей шире использовать упругие свойства материалов, что приводит к сокращению числа деталей в изделии;

для облегчения сопряжения и снижения требований к точности позиционирования установочных органов (захватных устройств роботов) детали должны иметь заходные скосы, фаски, центрирующие уступы. Углы конусности фасок на валу и в отверстиях не должны отличаться более чем на $5\text{--}15^\circ$. Предпочтительный угол конусности фасок для отверстий $\alpha = 45^\circ$, а для валов $\alpha = 10 \dots 30^\circ$ (при прессовых посадках — $5\text{--}15^\circ$), длина фаски 2—6 мм. Необходимый зазор в сопряжении по диаметру центрирующего уступа — 0,02—0,08 мм, длина уступа — 2—10 мм. Фаски следует предусматривать на валу и в отверстиях. Центрирующий уступ можно выполнить лишь в одной из сопрягаемых деталей. При прессовых и плотных посадках целесообразно использовать комбинации фасок и центрирующих уступов.

Наряду с обеспечением возможности эффективной автоматизации процессов обработки и сборки повышение технологичности конструкций позволяет также существенно снизить трудоемкость изготовления изделий, их себестоимость, а в ряде случаев и материалоемкость.

§ 4.2. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ СТАНКОВ-АВТОМАТОВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Комплексная автоматизация может обеспечить самую высокую экономическую эффективность только в случае выбора наиболее рациональных по концентрации операций параметров оборудования и технологических систем в целом. Недостаточная концентрация операций — это увеличение числа станков, основного и вспомогательного времени, производственной площади, станкоемкости, трудоемкости, себестоимости деталей. Автоматизация технологического процесса в условиях низкой концентрации операций неэффективна. Слишком высокая концентрация операций — это сложное, дорогостоящее и недостаточно надежное оборудование, частые отказы которого также вызывают увеличение станкоемкости и себестоимости продукции. От того, насколько удачно выбран вариант автоматизации процессов, зависит не только его экономическая эффективность, но и техническая целесообразность, прогрессивность и перспективность. Отсюда — важность разработки научно-технических основ оптимального агрегатирования технологических систем машин (ТСМ), т. е. научно обоснованных методов,

которые позволили бы по заданным исходным данным формировать общую совокупность технически возможных вариантов, производить их сравнительный анализ и отбор, включая выделение оптимального по выбранным критериям варианта.

Для проектирования технологических процессов с оптимальной концентрацией операций и для выбора наиболее эффективных параметров построенных на агрегатно-модульном принципе автоматов и автоматических систем решаются следующие задачи:

1. Разработка метода синтеза структурных схем и компоновок агрегатного оборудования, обеспечивающих заданную программу выпуска, качество деталей с минимальными стоимостными затратами. Синтез должен основываться на анализе машин-автоматов и систем машин, на методе генерирования структурно-компоновочных вариантов и методе направленного поиска наилучших решений без полного перебора всех возможных вариантов для конкретных условий производства.

2. Разработка метода расчета параметрических рядов унифицированных (агрегатных) узлов и элементов ТСМ с оптимальными технологическими параметрами, в первую очередь силовых узлов, транспортных и контрольных устройств, роботов и манипуляторов. Несответствие параметров узлов требованиям технологических процессов увеличивает габаритные размеры, массу, стоимость станков, затраты энергии на обработку, ухудшает условия обслуживания, т. е. снижает технико-экономическую эффективность автоматизации.

3. Разработка таких методов эксплуатации машин-автоматов и систем машин, которые обеспечивают в производственных условиях получение показателей производительности, надежности, ритмичности работы оборудования, качества изделий и экономической эффективности автоматизации, соответствующих их расчетным значениям.

Несмотря на разнохарактерность перечисленных трех задач, необходим единый методический подход к их решению. Особенностью излагаемого в книге метода является то, что объект оптимизации рассматривается как вероятностная система, эффективность которой определяется комплексом управляемых параметров. Задача оптимизации сводится к выбору, т. е. к управлению на стадии проектирования параметрами таким образом, чтобы обеспечить экстремальное значение критерия оптимальности с учетом принятых ограничений. Такой подход позволяет использовать в технологии машиностроения математический аппарат теории управления случайными процессами, а сами задачи решать с учетом реальных производственных условий, т. е. на основе вероятностных закономерностей протекания технологических процессов.

Таким образом, в теории проектирования ТСМ с оптимальными по концентрации операций параметрами эта проблема должна рассматриваться как проблема многопараметрического синтеза агрегатированных систем машин и решаться на вероятностной основе как задача

дискретная, комплексная, включая синтез параметров узлов, схем автоматов и автоматизированных систем, способов обслуживания.

Из перечисленных выше трех задач, методы решения которых применительно к автоматическим линиям из агрегатных станков для обработки корпусных деталей в массовом производстве изложены в [10], рассмотрим задачу оптимизационного синтеза технологических систем машин, komponуемых из агрегатных элементов, для условий массового и крупносерийного изготовления деталей.

Многолетний опыт развития машиностроения показывает, что наиболее ответственным этапом проектирования ТСМ являются разработка технического предложения, когда должен быть спроектирован оптимальный технологический процесс и выбран структурно-компоновочный вариант ТСМ как основа дальнейшего процесса проектирования (разработка конструкций специального инструмента и приспособлений, кинематических, гидрокинематических, электрических и других схем рабочих машин, конструирования механизмов и устройств, систем управления ТСМ и т.д.).

Именно на этой стадии дополнительные затраты времени и средств на обоснование принимаемых технологических, структурно-компоновочных и конструктивных решений позволяют существенно снизить стоимость средств автоматизации и повысить экономическую эффективность их применения.

На рис. 4.1. показана типичная для процессов механосборочного производства зависимость приведенных затрат $З_j$ на годовой выпуск продукции от главного параметра, влияющего на эти затраты (увеличение номера варианта характеризует увеличение этого параметра). Для процессов сборки наибольшее влияние на $З_j$ оказывает уровень автоматизации процесса (кривая 1), а при выбранном уровне автоматизации — степень концентрации операций (кривые 2–5). Для механической обработки кривая 1 характеризует влияние кон-

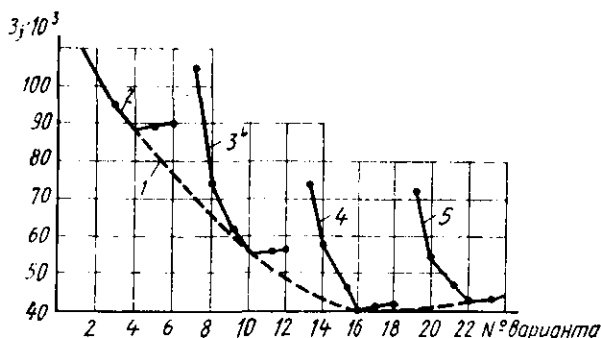


Рис. 4.1. Изменение критерия оптимизации $З_j$ для 24 вариантов процесса сборки топливного насоса двигателя КамАЗ

центрации операций для каждого варианта, а кривые 2—5 — влияние режимов резания. Как видно, оптимальный вариант соответствует не начальному или конечному, а промежуточному значению определяющего параметра.

Существенно ли влияние определяющего параметра на другие показатели процессов? Для вариантов обработки небольшой корпусной детали на агрегатных станках с различной концентрацией операций цикловая производительность оборудования для возможных вариантов технологического процесса изменяется в 100 раз, станкоемкость обработки в 40 раз, в несколько раз изменяются стоимость комплекта оборудования и себестоимость детали.

Для примера, который иллюстрирует рис. 4.1 (сборка топливного насоса дизельного двигателя с годовым выпуском $N_c = 250\,000$ шт.), трудоемкость сборки изменяется в 7 раз, количество занятых сборкой рабочих — в 6 раз, стоимость оборудования — в 27 раз, годовые затраты на сборку — в 3,5 раза. Следовательно, анализ вариантов и выбор оптимального из них — важнейшая задача первоначального этапа проектирования машин-автоматов и технологических систем машин.

Очевидно, что поиск оптимального решения существенно затрудняется не только большим количеством вариантов (на рис. 4.1, например, 24 основных варианта, которые необходимо разработать и сравнить), но и большим количеством параметров, которые необходимо рассчитать для оценки каждого варианта. Это ставит задачу оптимального проектирования в ряд наиболее сложных проблем автоматизации. Решение ее традиционным методом, т. е. сравнением двух-трех конкурирующих вариантов, выбранных на основе опыта и интуиции проектанта, не всегда эффективно, так как оптимальный вариант может и не попасть в число рассматриваемых. Полный перебор всех (или основных, рис. 4.1) возможных решений нецелесообразен даже с использованием ЭВМ, так как исходные данные по каждому варианту могут быть получены только после их подробной проработки, что существенно увеличивает трудоемкость проектных работ.

Следовательно, необходима разработка такого метода направленного поиска, который позволил бы на самых ранних этапах проектирования при ограниченном количестве исходных данных генерировать минимально необходимую совокупность технически целесообразных вариантов схем построения технологического оборудования, а затем путем их сравнительного анализа выбрать оптимальный по заданным критериям. Иными словами, речь идет о многопараметрическом синтезе компоновочных схем технологических машин и линий на основе анализа минимально возможного количества вариантов, что должно обеспечить получение наилучшего решения с наименьшей трудоемкостью проектных работ.

Эту проблему целесообразно решать методами оптимизационного многопараметрического синтеза технологических систем машин. Синтез должен основываться на анализе элементов и систем в целом, на

методе генерирования вариантов схем станочных систем и направленном поиске наилучших решений без полного перебора всех возможных для заданных условий.

Оптимальное агрегатирование станочных непереналаживаемых систем. Для условий массового производства задачу можно сформулировать так: разработать метод синтеза структурно-компоновочных схем технологических систем, позволяющий при минимальном количестве исходных данных найти необходимую совокупность технически целесообразных вариантов и путем их направленного отбора с использованием ЭВМ выбрать тот, который обеспечивает заданное чертёжом качество деталей и программу выпуска с наилучшими экономическими показателями.

Каким же образом в условиях большой вариантности структуры процесса и схем технологических систем можно на ранней стадии проектирования с минимальной трудоемкостью гарантированно находить оптимальные решения? Метод основан на комбинаторном, пошаговом способе решения задачи. Расчет на каждом шаге ведется на основе критерия, который учитывает главные параметры процесса, характеризующие степень концентрации элементарных операций каждого варианта станочной системы, т. е. приведенных затрат Z_j на обработку годовой программы деталей.

Формулы для определения приведенных затрат

1-й уровень оценок

$$Z^I = N_r \sum_{i=1}^M \left[(\delta + \beta) s_{\text{ст}} T_{\Phi i} + \frac{\alpha A_i}{N_r} a_i \right] + E_n \sum_{i=1}^M a_i A_i;$$

$$T_{\Phi i} = \frac{T_{\Pi i}}{f}, \text{ где } f \geq 2; a_i \geq \frac{\Lambda_r}{Q_{\Pi i}}; \sum B_i = 0.$$

2-й уровень оценок

$$Z^{II} = N_r \sum_{i=1}^M \left[(\delta + \beta) s_{\text{ст}} T_{\Phi} + \frac{\alpha A_i + H}{N_r} a_i \right] + E_n \sum_{i=1}^M a_i A_{ij};$$

$$T_{\Phi i} = \frac{T_{\Pi i} (1 + \sum B_i^0)}{f}, \text{ где } f \geq 2; a_i \geq \frac{N_r (1 + \sum B_i)}{Q_{\Pi i}},$$

$$\sum B_i = B_{\text{об} i} + B_{\text{ин} i}; B_{\text{ок}} = 0; \gamma = 1.$$

3-й уровень оценок

$$Z^{III} = N_r \sum_{i=1}^M \left[(\delta + \beta) (s_{\text{ст}} T_{\Phi i} + B_{\text{н} i} T_{\Pi i} \Delta s_{\Pi}) + \frac{\alpha A_i + H_i}{N_r} a_i \right] + E_n \sum_{i=1}^M a_i (A_i + H_{\text{н} i});$$

$$T_{\Phi i} = t_{\text{эл}} (1 + \sum B_i);$$

$$a_i \geq \frac{N_r (1 + \sum B_i)}{Q_{\Pi i}}; \sum B_i = (B_{\text{об} i} + B_{\text{н} i} + B_{\text{ок} i}) \gamma.$$

Обозначения:

- $T_{\text{ф}}$ — трудоемкость обработки детали;
 f — коэффициент многостаночного обслуживания;
 M — общее число концентрированных операций обработки детали;
 a — число одинаковых станков на каждой операции;
 $T_{\text{ц}}$ — время цикла станка;
 $N_{\text{г}}$ — заданная годовая программа выпуска;
 $s_{\text{ст}}, s_{\text{н}}$ — минутная зарплата станочника, наладчика;
 t_3 — время, расходуемое станочником на непосредственное обслуживание станка, включающее активное наблюдение за его работой;
 ΣB — сумма удельных потерь времени из-за отказов механизмов ($B_{\text{мб}}$), замены и регулировки инструментов ($B_{\text{и}}$), ожидания наладчика ($B_{\text{он}}$), занятого на других станках;
 γ — коэффициент, учитывающий наложенные простои;
 Λ — коэффициент занятости наладчика предварительной настройкой инструментов на размер;
 $Q_{\text{ц}}$ — цикловая производительность станка;
 $E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент экономической эффективности;
 $\alpha A_i, H_i$ — годовые затраты на оборудование и инструмент;
 $C_{\text{и}}$ — цена полного комплекта режущего инструмента.

Рассмотрим вначале задачу оптимизации структуры процесса и выбора структурно-компоновочных схем при заданных методах обработки поверхностей детали, а затем более сложную задачу выбора структуры процесса и методов обработки.

Для любой заданной детали множество вариантов схем станков можно разделить (рис. 4.2) на несколько подмножеств-классов: однопозиционные станки, многопозиционные станки (линии), системы из многопозиционных станков (линий). На первом шаге выбирается класс схем с минимальными значениями критерия Z , где будет продолжаться поиск. Для этого в каждом классе разрабатывается вариант с максимальной (обычно параллельно-последовательной) концентрацией операций, который характеризуется минимальным количеством станков для полной обработки детали. Принимается при расчетах коэффи-

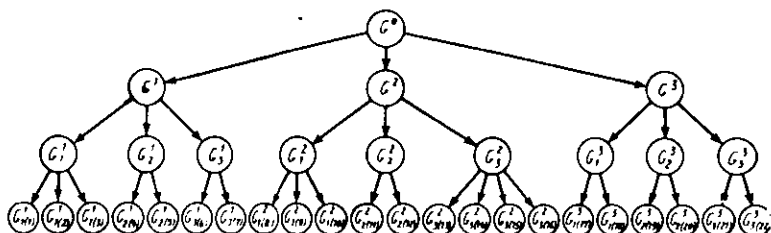


Рис. 4.2. Дерево возможных вариантов построения станочных систем

ценент технического использования системы $\eta_{г.и} = 1$, т. е. стопроцентная надежность оборудования. Затраты на заработную плату рабочих вычисляются по минимальному значению трудоемкости детали (за счет $f \rightarrow \max$). Применительно к таким «идеализированным» условиям обработки определяется минимально возможное в каждом классе значение Z^I (расчет по данным выше формулам приведенных затрат, 1-й уровень оценок). По нижней оценке одного представителя класса сразу отсекается весь класс схем, из рассматриваемых на первом шаге классов остается для дальнейшего анализа только один класс с минимальным значением Z^I , т. е. резко сужается область поиска.

На втором шаге, в классе, у которого значение Z^I оказалось наименьшим, выбирают перспективный подкласс, который характеризуется параллельной, последовательной или параллельно-последовательной обработкой. С этой целью дополнительно к выбранному на первом шаге варианту обработки детали генерируют новый вариант построения системы из соседнего подкласса (рис. 4.3). Для выбора «перспективного» подкласса схем оценка вариантов на втором шаге (по Z^{II}) осуществляется с учетом надежности оборудования и инструментов, т. е. с большим приближением к реальным условиям. На третьем шаге в выбранном подклассе схем анализируют варианты, отличающиеся числом сторон обработки детали на каждой позиции, а также числом позиций станочных систем, при этом расчет критерия Z^{III} выполняется с учетом собственных и дополнительных простоев оборудования, фактической трудоемкости обработки детали (по числу занятых на линии операторов и наладчи-

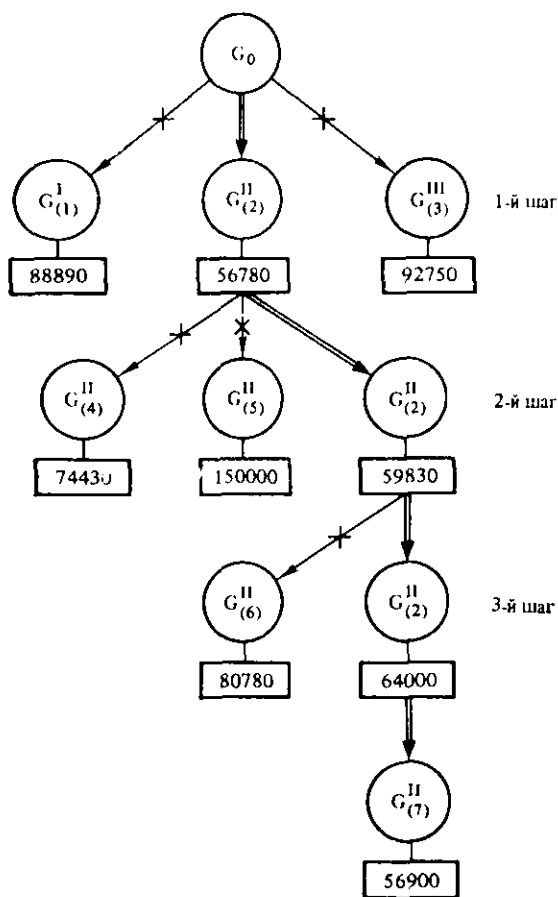


Рис. 4.3. Схема направленного поиска оптимального варианта

ков) и др. Учет всех основных факторов приводит к тому, что оптимальным не всегда оказывается вариант с максимальной в данном подклассе схемой концентрации операций. Разница между максимальной и оптимальной концентрацией тем больше, чем сложнее рассматриваемое оборудование и чем меньше программа выпуска деталей.

Важной особенностью метода, гарантирующей оптимальное решение, является то, что для принятия окончательного решения необходим возврат к результатам предыдущих расчетов, т. е. сравнение полученного на третьем шаге значения Z^{III} с оценками Z_j для рассмотренных вариантов на двух предыдущих шагах. Если $Z^{III} < Z_j$, то выбранный вариант оптимален. Если $Z^{III} > Z_j$, то необходимо развивать вариант Z_j , на каждом последующем шаге сравнивая его оценку с Z^{III} (второй этап поиска).

Таким образом, пошаговый метод оптимизации требует разработки минимально возможного числа вариантов структуры процесса и схем станочных систем (обычно 5—6 вариантов), точной оценки 2—3 вариантов только на последнем шаге, т. е. с наименьшей трудоемкостью на самой ранней стадии проектирования позволяет выбрать наилучшее решение. Метод является органической частью САПР. Составленная программа либо полностью автоматизирует процедуру поиска оптимального варианта, либо позволяет вести поиск в режиме диалога «проектант — ЭВМ». Использование метода способствует быстрому накоплению и обобщению опыта предыдущих решений, что в дальнейшем сокращает область поиска (в ряде случаев он может быть сведен к поиску детали-прототипа с соответствующей программой выпуска).

Схемы станков и станочных систем в процессе направленного поиска оптимального решения проектируются на основе метода генерирования вариантов технологического процесса и классификации схем станочных систем по степени концентрации операций. На рис. 4.4 приведена обобщающая классификация структурных схем механосборочного оборудования, на основе которой разработаны частные классификации схем станочного и сборочного оборудования для массового и серийного производства (рис. 4.5). В соответствии с этой классификацией (см. рис. 4.4) структурные схемы станочного оборудования разделены на три класса. Класс *KI* — станки для обработки деталей в одной позиции, *KII* — станки или сблокированные линии для многопозиционной обработки деталей, *KIII* — станочные системы из многопозиционных станков или участков автоматических линий, объединенных гибкой связью. Каждый класс схем включает в себя три подкласса: станки или станочные линии для последовательной (*Пс*), параллельной (*Пр*) и параллельно-последовательной (*ПсПр*) обработки. Иерархия построения классификации такова, что каждый последующий класс может включать в себя схемы любого из трех предыдущих подклассов.

Модификация схем указанных подклассов предусматривает наряду с обработкой одной детали в каждой позиции ($p = 1$; $\gamma = 1$) одновременную обработку нескольких одинаковых ($p > 1$; $\gamma = 1$) и разных

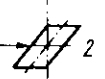
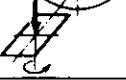
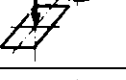
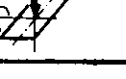
Движение детали	Движение инструмента				
					
					
			Соответствует схеме 1в или 2а		
					
		Соответствует схеме 1б или 4а			
					
					
					

Рис. 4.5. Структурные схемы станков классов К1Пс

($p > 1$, $\gamma > 1$) деталей, а также последовательную обработку разных ($p = 1$, $\gamma > 1$) деталей. При таком построении классификационная таблица систематизирует по признаку концентрации операций не только существующие, но и возможные, еще не реализованные схемы.

Первичной информацией для разработки вариантов структур процесса и технологических схем станочных систем служат чертеж дета-

ли и заготовки, программа выпуска, характеристики оборудования имеющегося типажа, исходный технологический маршрут обработки детали с выбранными черновыми и чистовыми базами, составленный с учетом обеспечения заданной точности и качества обработки.

Исходная информация для синтеза заносится в специальные таблицы (табл. 4.1). С ее использованием на основе заданного технологического маршрута обработки, сформированных инструментальных блоков и классификации структурных схем агрегатного оборудования осуществляется синтез схем тех вариантов станочных систем, которые необходимы для поиска оптимального (см. рис. 4.3).

Если методы обработки и технологический маршрут не определены полностью конструкцией детали и техническими требованиями к ней, а могут варьироваться, задача оптимизации процесса является более сложной, чем рассмотренная выше.

Разработке метода оптимизации технологических маршрутов детали, прогнозированию точности обработки для использования выбранного маршрута, анализу схем и компоновок станков предшествует анализ имеющихся статистических данных, характеризующих точностные возможности основных операций обработки деталей на автоматизированном оборудовании (т. е. банка данных для классификатора обрабатываемых поверхностей деталей — представителей отрасли: автомобилестроения, тракторостроения и др.).

Возможность получения одинаковых по качеству обработки результатов различными методами позволяет на основе классификаторов поверхностей и методов обработки наметить варианты технологического процесса, которые будут отличаться производительностью, структурой, схемами применяемого оборудования, экономической эффективностью.

Задачу оптимизации можно решать на основе описанного ранее метода. Преимущества такой оптимизации: задача решается за минимальное количество шагов, при рассмотрении минимально возможного числа вариантов. Методы обработки, структуру процесса и компоновочные схемы станков выбирают взаимосвязанно, т. е. на основе комплексного подхода, обеспечивающего оптимальное решение.

Формирование вариантов маршрутов обработки элементарной поверхности ведется в несколько этапов.

1. Изучение чертежа детали и технических требований к ней, выделение поверхностей, подлежащих обработке, анализ точности и параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей.

2. Выбор методов обработки, обеспечивающих необходимые точностные и качественные параметры поверхности.

3. Определение числа переходов, необходимых для полной обработки поверхности в соответствии с требованиями чертежа, и возможных методов обработки, реализующих эти переходы, формирующих геометрические параметры поверхности и обеспечивающих заданную точность ее и шероховатость, выделение методов, у которых по-

казатели по точности и шероховатости при обработке поверхности равны или близки между собой.

4. Подбор инструментов, реализующих соответствующие методы обработки, с учетом точности обработки, шероховатости поверхности и возможностей формообразования поверхности.

5. Составление вариантов маршрутов.

Определив таким образом качество и содержание вариантов маршрутов обработки элементарной поверхности, следует отметить, что вариант маршрута включает в себя информацию о поверхности, методах ее обработки, последовательности их применения и обеспечиваемой ими точности и шероховатости.

На основе классификаторов поверхностей и методов обработки, а также таблиц, содержащих данные о точности и шероховатости, характеризующих методы, приступают к разработке вариантов маршрутов.

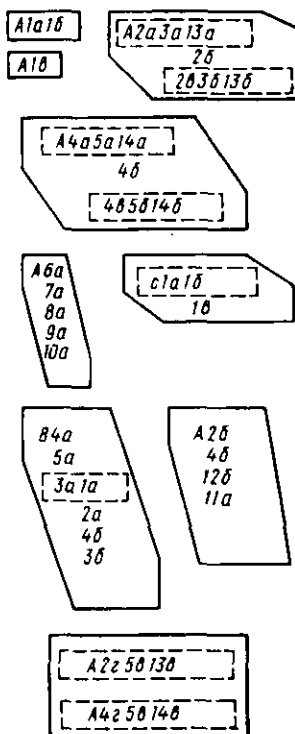
Понимая общих принципов формирования вариантов маршрутов обработки элементарных поверхностей существует ряд специфических условий и ограничений в применении того или иного метода. Подобные ограничения вызваны прежде всего различными конструктивными особенностями обрабатываемых элементарных поверхностей, такими, как геометрические размеры, форма и взаимосвязь одной элементарной поверхности и другими.

Рассмотрим метод формирования вариантов маршрутов обработки элементарной поверхности — отверстий. Число возможных методов обработки отверстий с указанными параметрами равно 10 (табл. 4.2), однако часть их обеспечивает равную точность и шероховатость, поэтому число целесообразных вариантов маршрутов равно 32. Допустим, необходимо обеспечить 7-й квалитет точности поверхности и параметр шероховатости 1,25, следовательно, конечными операциями могут быть тонкое разворачивание и тонкое растачивание. Формообразующим методом при отсутствии отверстия в заготовке является сверление, обеспечивающее 11–12-й квалитеты точности и параметр шероховатости 80. Близкие параметры обеспечивают, кроме того, рассверливание, растачивание и зенкерование необработанного отверстия (по корке). Следовательно, первый и последний переходы разделяются пятью квалитетами точности и четырьмя классами шероховатости.

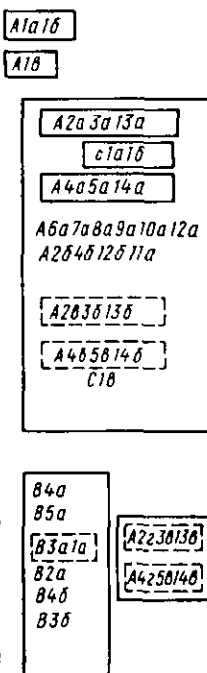
Реальный технологический процесс обладает определенными ограничениями на последовательность выполнения элементарных операций, следовательно, действительное число вариантов не 32, а значительно меньше. Ограничения вызваны требованиями к точности расположения обрабатываемой поверхности, конструктивными возможностями самой детали. Располагая несколькими вариантами технологического маршрута, осуществляют формирование структуры процесса и схем станков. Как указывалось, исходной информацией служит чертеж детали с техническими условиями на ее изготовление, программа выпуска с учетом ограничений на последовательность выполнения тех или иных элементарных операций (табл. 4.3).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	а	фрезеро- вание	зенкерова- ние	зенкерова- ние	зенкерова- ние	свер- ление	свер- ление	свер- ление	свер- ление
	б	фрезеро- вание	сверле- ние	разверты- вание	сверле- ние	разверты- вание			
	в	шлифова- ние	разверты- вание	расточи- вание	разверты- вание	расточи- вание			
	г		расточи- вание		расточи- вание				
В	а	цекова- ние	зенкерова- ние	зенкерова- ние	сверле- ние	сверле- ние			
	б			нарезание резьбы	разверты- вание				
С	а	сверле- ние							
	б	снятие фаски							
	в	нарезание резьбы							

I степень концентрации операций



II степень концентрации операций



III степень концентрации операций

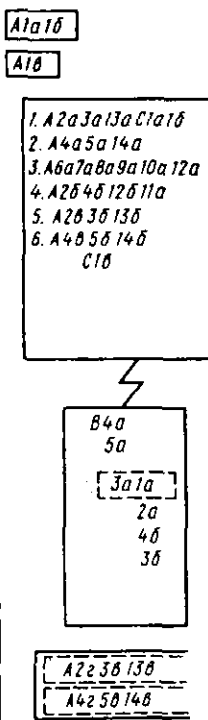


Таблица 4.2. Структурные схемы обработки

Квалитет	Параметры шероховатости, мкм		Обработка отверстий			
	Rz	Rq				
12 12-11	81 40	— —	Сверление	Рассверливание	Растачивание черновое	Зенкерование не- обработанного от- верстия
11-9 9-8	40-20 20-2,5	—	Зенкерование обработанного отверстия		Растачивание предварительное	
9-7	—	2,5-1,25	Развертывание чистовое		Растачивание чистовое	
7-6	—	0,63- 0,32	Развертывание тонкое		Растачивание тонкое	

Таблица 4.3. Ограничения на выполнение переходов

Стороны детали	Необходима одно- временная обработка	Необходима последо- вательная обработка
А	А 2а 3а 13а А 4а 5а 14а А 2а 3в 12в А 4в 5в 14в А 2г 3в 13в А 4г 5в 14в	А 1в А 2г 3в 13в А 4г 5в 14в

Таблица ограничений для стороны *A* на последовательность и одновременно выполнения ряда технологических переходов составлена на основе анализа технических требований, указанных в чертеже детали, и ее конструктивных особенностей.

Перечисленные ограничения (табл. 4.3). требуют одновременной обработки ступенчатых отверстий комбинированным инструментом и обеспечения подготовки чистовой базы для окончательной обработки этих отверстий.

В таблице формирования вариантов (табл. 4.2) записывают последовательно все переходы, необходимые для обработки поверхностей, расположенных с каждой стороны детали.

Оценка оптимального варианта основывается на расчете критерия приведенных затрат (см. табл. 4.1), причем варианты компоновок, для которых они рассчитываются, сформированы по каждому из вариантов маршрута и, кроме того, по трем степеням концентрации операций (рис. 4.3). Таким образом, на первом шаге оптимизации одновременно оцениваются варианты маршрута обработки, реализованного рассматриваемой компоновкой оборудования, и осуществляется выбор направления дальнейшего поиска, так как оптимальность варианта компоновки оценивается для каждого из трех классов концентрации операций. Варианты синтезируют так, чтобы осуществить в каждом классе обработку детали на наименьшем количестве станков данного класса и обеспечить минимум капитальных затрат и минимальную трудоемкость обработки.

На втором шаге значение критерия для выбранного варианта маршрута и класса схем станков концентрация операций уточняется, при этом варианты компоновок разрабатываются с последовательным и параллельно-последовательным выполнением элементарных операций. На третьем шаге осуществляется перебор нескольких вариантов компоновок одного подкласса с расчетом всех параметров, влияющих на критерий приведенных затрат (см. рис. 4.7).

Необходима проверка того, что на последнем шаге оптимальный вариант маршрута обработки окажется в том же классе концентрации операций, что и оптимальный по структуре вариант, так как каждый вариант маршрута только на первом шаге реализован на схемах станков всех трех классов концентрации операций. Вследствие этого проверка конкурирующих вариантов в конечном итоге должна вестись по двум направлениям: оценка маршрута обработки и оценка структурно-компоновочной схемы оборудования.

Применительно к рассматриваемому в качестве примера технологическому процессу обработки корпуса масляного насоса (рис. 4.6, 4.7) вариантность маршрута обработки может возникнуть в результате использования протягивания взамен фрезерования при обработке поверхности *A1*. Однако в силу специфических особенностей детали (деталь плоская, ее конструкция и базирование не позволяют обеспечить значительное усилие зажима) протягивание можно исключить из рассмотрения как метод, неприменимый в конкретном случае, и не оце-

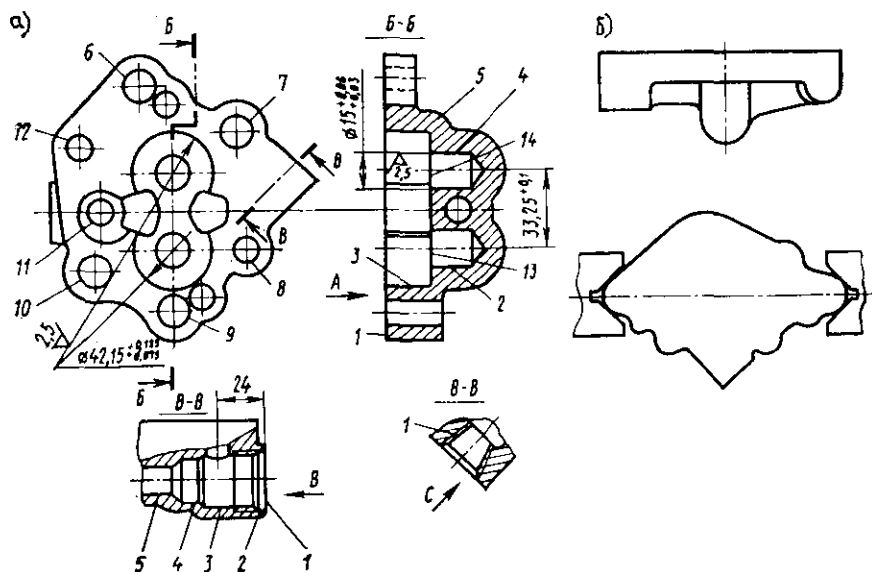


Рис. 4.6. Обрабатываемая деталь (а) и схема ее базирования (б)

нивать его по критерию Z . Следовательно, на первом шаге оптимизации маршрут обработки уже определен и необходимо разработать только три варианта схем, т. е. по одному варианту в каждом классе концентрации операций.

Это варианты 1, 2, 3, представленные в табл. 4.1 формирования данных. Как уже упоминалось, выше, проработка и оценка вариантов производится в три этапа, причем оценка одного и того же варианта с каждым шагом увеличивается, поскольку формулы построены так, что с каждым шагом в рассмотрение включается все большее число параметров, влияющих на критерий Z , что можно видеть из табл. 4.1 и рис. 4.3.

Таким образом, метод позволяет, определяя направление поиска оптимального варианта, осуществить формирование и оценку только тех схемных решений, которые необходимы для нахождения оптимального, а не перебирать и оценивать все возможные решения.

Необходимо отметить, что изложенный метод основан на однокритериальном подходе к решению задачи, причем значение критерия рассматривается как величина детерминированная. Вместе с тем многие из параметров, влияющих на критерий на стадии проектирования, могут быть рассчитаны лишь приближенно. Вследствие этого с достаточной достоверностью определяется лишь интервал, в котором находится значение критерия. В этих условиях иногда за оптимальные могут быть приняты не самые эффективные варианты построения станочной системы. Результат будет зависеть от того, с какими погрешно-

стями выбраны значения определяющих параметров при расчете. Поэтому в случаях, когда точность расчета параметров недостаточно высока (например, на стадии проектирования не всегда возможно точно оценить стоимость оборудования и средств автоматизации по рассматриваемым вариантам, его надежность и т.д.), задачу оптимизационного синтеза целесообразно решать в вероятностной постановке, оценивая варианты случайным значением критерия и опираясь при сравнении вариантов на вероятностные характеристики критерия (математические ожидания, дисперсии, функции распределения и т.д.). Ниже будет изложен один из методов решения этой задачи.

Вместе с тем учитывая, что технология обработки деталей определяющим образом влияет на эффективность автоматизации, целесообразно, после того как мы рассмотрели общую идею направленного поиска оптимального варианта технологического процесса и схем построения оборудования, реализующего этот процесс, более детально остановиться на задаче проектирования с использованием ЭВМ рациональных маршрутов обработки, что позволит резко сократить число рассматриваемых вариантов технологии на стадии разработки технического предложения и тем самым упростить решение общей оптимизационной задачи.

Направленный поиск рационального технологического маршрута обработки деталей. Проблема автоматизированного проектирования технологических процессов возникла давно, однако особую актуальность она приобрела в настоящее время, так как именно от ее решения зависит дальнейшее повышение эффективности технологических процессов обработки, снижение трудозатрат на проектирование, разработка наиболее рациональной технологии на базе последних достижений науки.

Накопленный в промышленности опыт и теоретические разработки позволили осуществить системный подход к решению задачи автоматизированного проектирования оптимальных технологических процессов и представить составляющие элементы системы в виде некоторой иерархической структуры. Всякий системный объект в общем случае может быть записан следующим образом:

$$Q = \{H, S, F, Z\},$$

где H — связи объекта с окружающей средой; S — структура объекта; F — функциональное назначение; Z — совокупность свойств объекта.

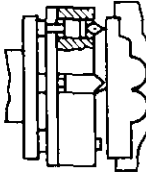
При этом модель, реализующая объект, должна адекватно его описывать, причем к описанию в этом случае предъявляется ряд требований:

необходимо разработать систему достоверных критериев для правильности анализа альтернатив и оптимальности применяемых решений на каждом уровне иерархической структуры объекта;

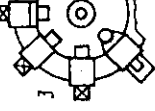
вариант 2б

Протягивание	
T_u	
a^I	
T_ϕ^I	    
ΣA^I	

вариант 2

Фрезерование	
T_u	
a^I	
T_ϕ^I	    
ΣA^I	

вариант 2а

T_u	a^I	T_ϕ^I	ΣA^I	$B_{од}$	B_u
					

вариант 4

T_u	a^I	T_ϕ^I	ΣA^I	$B_{од}$	B_u
					

Зг = 59830

Зг = 74300

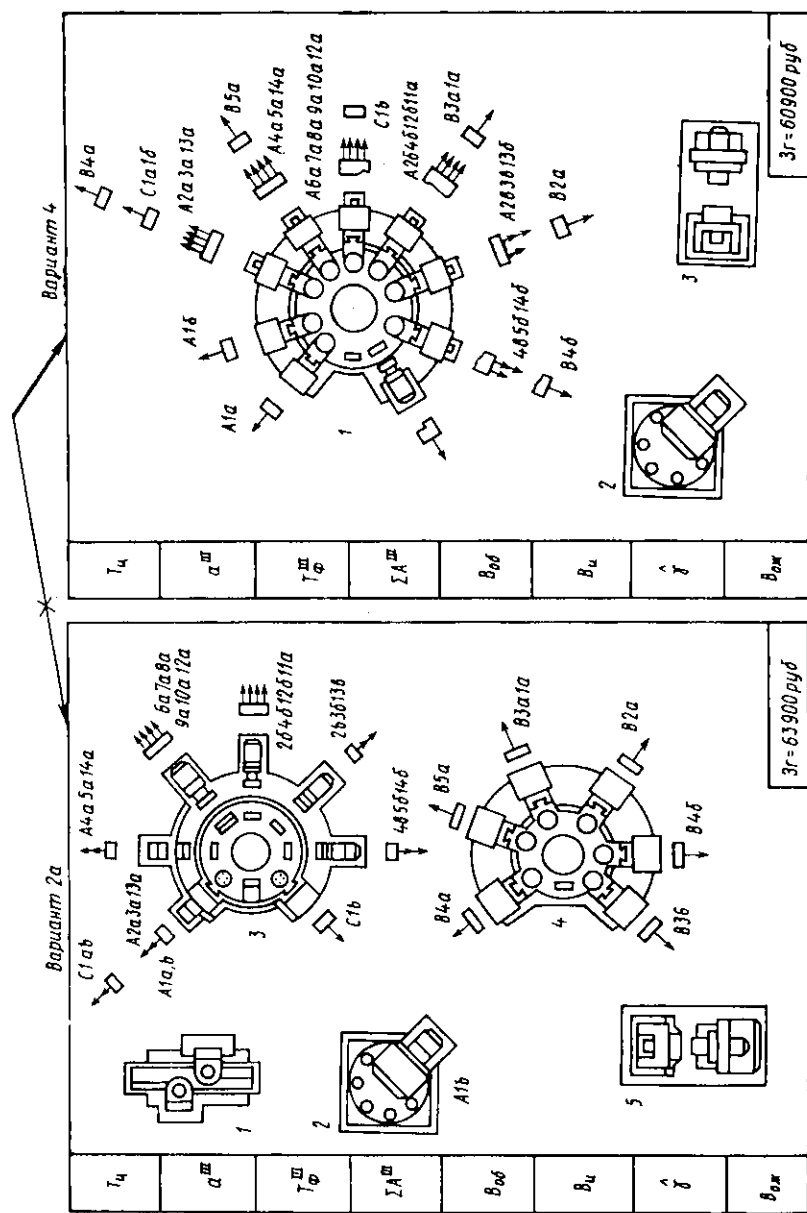


Рис. 4.7. Схема направленного поиска оптимального маршрута обработки и структурно-компоновочных схем агрегатного оборудования (объяснение обозначений см. на с. 61)

следует применять только такие стратегии синтеза вариантов и принятия решений, которые заведомо исключают нереализуемые варианты функций объекта;

необходимо использовать такие принципы подготовки информации и наложения ограничений, которые исключают появление ошибочных или нецелесообразных сочетаний свойств разрабатываемой системы.

Технологический процесс в общем виде может быть представлен множеством

$$T = \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k,$$

где τ_k — технологический параметр, характеризующий часть технологического процесса, при реализации которого объект приобретает заданные свойства, присущие заданной операции.

Таким образом, вся система может быть описана некоторым исходным числом элементов, составляющих определенную степень детализации. Для технологических процессов механической обработки под этими элементами следует понимать технологический переход, элементарную поверхность и ряд параметров, каждый из которых обладает определенным набором признаков. Эти признаки в процессе технологического проектирования могут видоизменяться и зависеть от ряда параметров процесса. Запишем их в следующей форме:

$$\tau_i < S_a, t_{m\ i}, v_i, l_i, \dots, x_i >.$$

Представленный вектор признаков параметра τ_i характеризует технологический переход с учетом конструкторско-технологических и технико-экономических показателей. Запись функциональных и логических связей математически может быть выражена различными способами, например заданием аналитических зависимостей, бинарными соотношениями, рядом определяющих аксиом и т.п., но во всех случаях связи должны быть формализованы.

Одним из ответственных этапов при автоматизированном проектировании технологических процессов является подготовка, классификация и формализация исходных данных. В первую очередь это относится к информации, связанной с общим уровнем разрабатываемого технологического процесса методами механической обработки, наличием и возможностями металлорежущего оборудования, состоянием станочного парка, применяемым инструментом и т.п. Важность этого объясняется тем, что результаты, которые будут получены в итоге, зависят не только от системы проектирования, но и от правильного ввода информации. Характер решаемой задачи, ее многовариантность и сложность требуют обязательного слежения за вводимой информацией и промежуточными результатами расчета отдельных этапов в течение всего хода проектирования. При этом в отдельных случаях необходимо выносить коррективы на отдельных этапах оптимального решения, не нарушая при этом общей последовательности действий.

Рассмотрим* последовательность процесса автоматизированного проектирования, в котором отражены основные этапы, и остановимся на некоторых из них.

Так, банк данных описывает в матричной или списочной форме характеристики технологических процессов обработки деталей на металлорежущем оборудовании: кодирование информации о детали, выбор схемы базирования; определение припусков; составление маршрута обработки элементарной поверхности; формирование инструментальных блоков; распределение инструментальных блоков и отдельных инструментов по позициям; синтез вариантов структурно-компоновочных схем станочного оборудования; направленный поиск оптимальной компоновки; моделирование работы станочной системы; вычерчивание планировки линии. При этом на различных этапах процесса проектирования используется одна и та же форма записи кортежа признаков, пополняемая необходимой информацией из банка данных или результатами, получаемыми расчетом и моделированием. На первых этапах формализованного описания технологического процесса необходимо иметь:

- систему кодирования различных типов деталей (диски, валы, корпусные детали и т.п.);

- систему кодирования методов получения заготовок;

- систему идентификации вариантов маршрутов обработки отдельных поверхностей и классификатор поверхностей, наиболее распространенных в деталях машин.

Используя закодированную информацию о детали и ориентируясь на типовые схемы базирования, размещенные в банке данных, выбирают поверхности, которые считаются базовыми и являются системой отсчета при определении погрешности установки. Таким образом, вектор признаков детали дополняется значениями погрешности установки, причем погрешность базирования и погрешность закрепления моделируют по соответствующим подпрограммам, использующим банковскую информацию.

Выход этого этапа представляется в виде кодов, приписываемых сторонам и означющих, что базовые поверхности при данной схеме базирования не обрабатываются. В том случае, если требуется перебазировка детали, на этапе определения баз необходимо ввести другой массив для поверхностей (или сторон), которые обрабатывают от чистовых баз. По усредненным значениям для последующего расчета припусков на обработку определяют погрешности базирования по данной схеме.

Располагая информацией о погрешности базирования по каждой схеме, характеристиками точности и шероховатости и рядом других параметров поверхностей, определяют число переходов и припуски

* См.: Дашенко А. И., Гадельшин В. К. и др. Автоматизированное проектирование маршрута обработки корпусной детали. Автоматизированные системы в машиностроении. Омск, Омский политехнический ин-т, 1984, с. 27–34.

на каждый переход. С этой целью разрабатывают список вариантов маршрутов обработки отдельных поверхностей, включенных в классификатор, и располагают их определенным образом. В этом случае возможен этап предварительного формирования этого списка на основе моделирования ситуаций, т. е. последовательно используя критерии оценки маршрутов по себестоимости, точности и сложности реализации. Варианты маршрутов для каждой элементарной поверхности располагают в банке данных в таком виде, чтобы можно было однозначно обращаться к варианту с минимальной оценкой по какому-либо из критериев. Так как на этом этапе формирования маршрута неизвестны конкретные наборы инструментов, которые работают в многошпиндельных коробках, то оценка точности и себестоимости производится для одного инструмента. Это обстоятельство несущественно влияет на значение моделируемых погрешностей и оценки, так как в многошпиндельных коробках объединяют однотипные виды инструментов. Проведя операцию поиска маршрутов обработки элементарных поверхностей, получают набор переходов обработки всей детали в целом, что позволяет приступить к формированию блоков инструментов. Этот этап является одним из наиболее ответственных, так как именно он определяет структуру оборудования, число позиций, необходимых для обработки детали, и в конечном итоге состав и характеристики силовых узлов. При формировании инструментальных блоков (см. табл. 4.1) следует учитывать различного рода ограничения на их составление. Это достигается путем предварительного составления матриц ограничений на последовательность переходов и параллельность их выполнения. Так, одной из основных характеристик, налагающих ограничения на последовательность, является необходимость формообразования поверхности. Например, требуется получить отверстие диаметром 20 мм с шероховатостью 2,5 по 7-му качеству. Для этого необходимы три перехода: сверление, зенкерование, развертывание. Естественно, что сверление предшествует остальным переходам, так как является формообразующим методом.

На параллельную работу инструментов влияет ряд условий, включающих признаки (ограничения) в определенной последовательности:

1. Ограничения, зависящие от геометрии и пространственного расположения обрабатываемых поверхностей:

а) расположение обрабатываемой поверхности относительно основной (перпендикулярно или под углом);

б) межосевое расстояние по чертежу детали, определяющее возможность одновременной обработки отверстий;

в) соосные поверхности, одновременная обработка которых невозможна (без применения комбинированного инструмента).

2. Ограничения, зависящие от технологических факторов:

а) метод обработки (инструментальные блоки, включающие в себя только осевой инструмент);

б) ограничения, вызванные условиями обработки, режимами резания (подача, число оборотов);

в) ограничения, вызванные наборами маршрутов обработки ряда элементарных поверхностей, последовательность переходов в которых нельзя нарушать.

3. Ограничения, зависящие от требований точности, предъявляемых к обрабатываемым поверхностям и их взаимному расположению:

а) точность межосевых расстояний (обеспечивается наилучшим образом совместной обработкой через кондукторную плиту);

б) шероховатость (обеспечивается при совмещении однотипных методов обработки на соответствующих режимах);

в) перпендикулярность (обеспечивается при обработке на одной позиции или при использовании одной из сторон как базовой).

Перечисленные виды ограничений носят достаточно общий характер, тогда как для использования их в машинном виде они должны быть строго формализованы. Это достигается использованием матриц бинарных отношений для вариантов совмещений инструментов и определения последовательности их работы. Набор этих матриц охватывает качественные характеристики ограничений, а содержание предусматривает разбиение в зависимости от геометрических и конструктивно-технологических параметров изделия и оборудования. Матрицы бинарных отношений представляют собой банковскую информацию, которая пополняется в процессе функционирования системы автоматизированного проектирования как в количественном, так и качественном отношениях. Эта информация является основной для осуществления в конечном итоге направленного синтеза вариантов структурно-технологических схем станков и последующего поиска оптимальной компоновки станочных систем по разработанным стратегиям и критериям.

В формальном виде модель станка может быть представлена как $S = \langle E, X \rangle$,

где E — множество элементов (агрегатных узлов),

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$;

X — множество бинарных отношений на множестве E ,

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,

которые представлены в виде матриц по каждому из ограничений.

В соответствии с этими множествами формируются варианты схем станков в трех степенях концентрации операций по следующему принципу:

формирование инструментальных блоков с максимальной концентрацией инструментов в каждом из них по всему технологическому процессу;

формирование револьверных головок с двумя, тремя гранями и более с целью разработки вариантов схем станков для последовательной обработки;

формирование револьверных головок с многошпиндельными коробками для синтеза вариантов схем параллельно-последовательной обработки [10].

Таким образом, типы силовых узлов, образующих тот или иной вариант компоновки различных степеней концентраций операций и всех видов совмещенной обработки, содержат исходную информацию для разработки вариантов схем станков или автоматических линий. Направленный синтез заключается в формировании сочетаний агрегатных узлов по определенным правилам, размещенным в виде матриц бинарных отношений в банке данных. Характер синтеза схем станков определяется стратегией направленного поиска, реализованного на основе метода «ветвей и границ», и заключается в последовательном формировании вариантов схем для первой, второй и третьей степени концентрации операций. После определения оптимального подмножества в одном из них формируют варианты последовательной, параллельной и параллельно-последовательной обработок. В качестве критерия оценки выступают приведенные затраты, а в качестве итога — схема станочной системы с оптимальной концентрацией операций. Для достаточно надежного определения производительности предлагаемого варианта необходимо провести моделирование работы станочной системы и определить емкость бункерных устройств, магазинов или межоперационных заделов. Последовательность разработки схем станков более подробно представлена на рис. 4.7. Как видно из рис. 4.8, технологическое проектирование, реализуемое в САПР, разделено на ряд подсистем, позволяющих решать отдельные вопросы в диалоговом режиме, проводить коррекцию ввода — вывода.

Проектирование технологического маршрута обработки корпусной детали. При построении станочных систем важную роль приобретает оптимальное проектирование технологического процесса обработки, что реально можно осуществить в условиях использования автоматизированной системы проектирования (САПР). Для автоматизации процесса проектирования технологического маршрута механической обработки необходимо формализовать процесс проектирования; разработать метод поиска оптимального технологического маршрута.

Рассмотрим процедуру поиска, основанную на методе ветвей и границ и методе Магу. Процесс проектирования иллюстрируется примером построения маршрута обработки корпуса фильтра грубой очистки (рис. 4.9).

По чертежу детали и техническим условиям на ее изготовление формируется исходная информация для проектирования, включающая в себя множество элементарных технологических переходов (ЭТП), совокупности правил (ограничений) на совмещение ЭТП в позиции и последовательность их выполнения. Требуется распределить ЭТП по позициям агрегатных станков или автоматических линий рациональным образом, т. е. так, чтобы получить наибольшую концентрацию операций при условии сохранения надежности и обеспечения заданной производительности.

Пусть технологический процесс обработки деталей дифференцирован на n ЭТП $x_1, x_2, \dots, x_n$, каждый из которых выполняется одним инструментом за один проход, причем $U_{x_i} = X$. Требуется разбить множество

X на попарно непересекающиеся непустые подмножества z ($\alpha = 1 \dots r$), каждое из которых определяет группу ЭТП, выполняемых на одной и той же позиции станочной системы, и $U_{z_\alpha} = X$. Для корпуса фильтра грубой очистки совокупность ЭТП, образующих множество X , приводится в табл. 4.4. Обозначения обрабатываемых элементов показаны на рис. 4.9.

Таблица 4.4. Перечень элементарных технологических переходов для обработки корпуса

№ ЭТП	Обозначение ЭТП	Наименование элементарного технологического перехода	№ ЭТП	Обозначение ЭТП	Наименование элементарного технологического перехода
1	B1	Фрезеровать	15	D1a	Сверлить
2	B2a	Сверлить	16	A1a	»
3	B3a	»		A1б	»
4	B4a	»	17	A2a	»
5	B5a	»		A2б	»
6	B4б	Досверлить	18	A3a	»
7	B5б	»		A3б	»
8	B6a	Сверлить	19	A4a	»
	B6б	Снять фаску		A4б	»
9	B7a	Сверлить	20	B1a	»
	B7б	Снять фаску	21	G1	Цековать
10	B7в	Досверлить	22	G2	»
11		Развернуть	23	G3	»
12	A7	Подрезать	24	G4	»
	A5a	Зенкеровать	25	B1б	Нарезать резьбу
		»	26	A1в	То же
13	A5б	Снять фаску	27	D1б	»
	A5в	То же	28	A2в	»
14		Расточить	29	A3в	»
	A6в	»	30	A4в	»

Форма детали, взаимное расположение поверхностей, требования к точности изготовления, технические условия накладывают ограничения на совмещение и последовательность выполнения ЭТП. Если поверхность обрабатывается в несколько проходов и последовательность их строго определена планом обработки (сверление — зенкерование — развертывание) или один ЭТП не может быть выполнен ранее другого, так как предыдущий является формообразующим и т.п., то соответствующие ЭТП вступают в отношение частичной упорядоченности $x_i \rightarrow x_j$ (переход x_i выполняется ранее x_j). Существенное влияние на последовательность выполнения ЭТП оказывает выбран-

а)

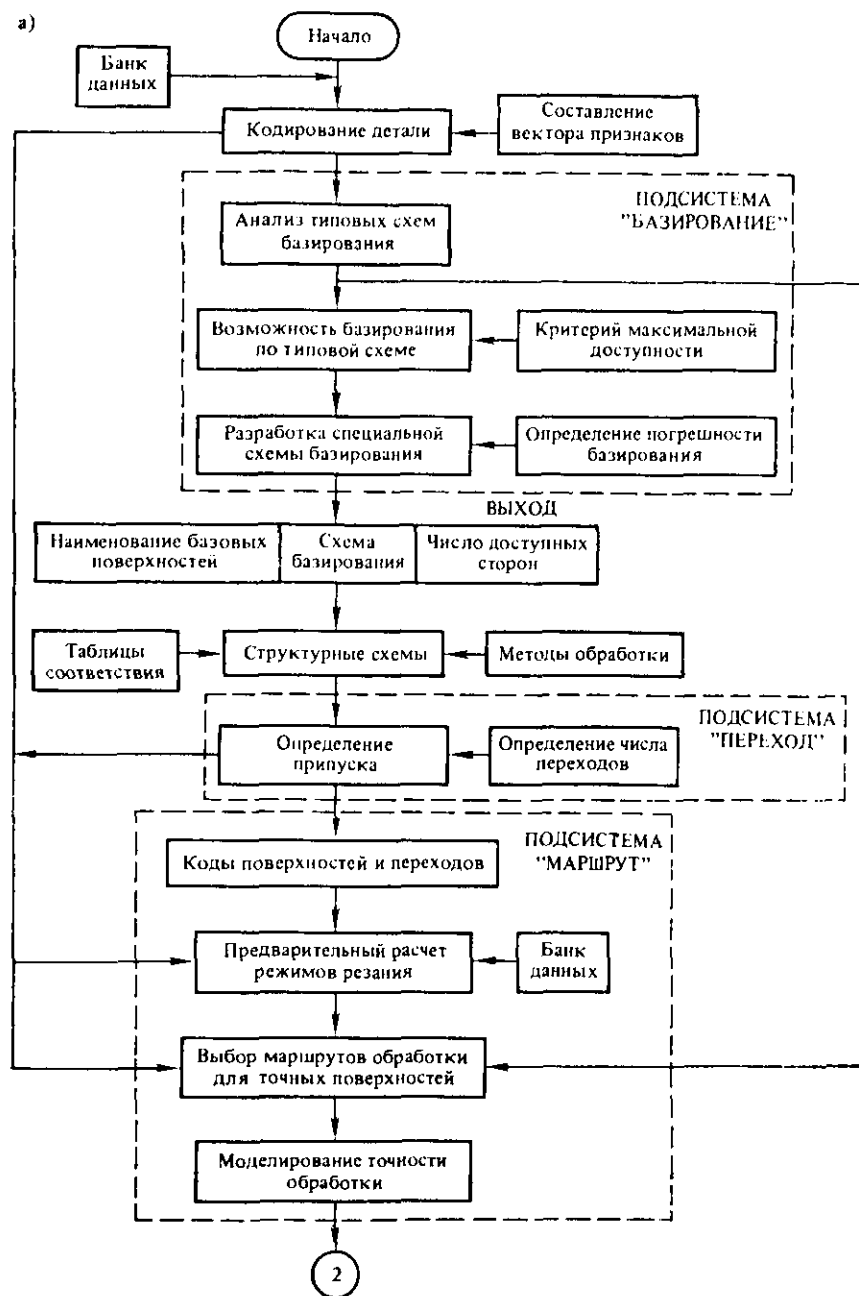
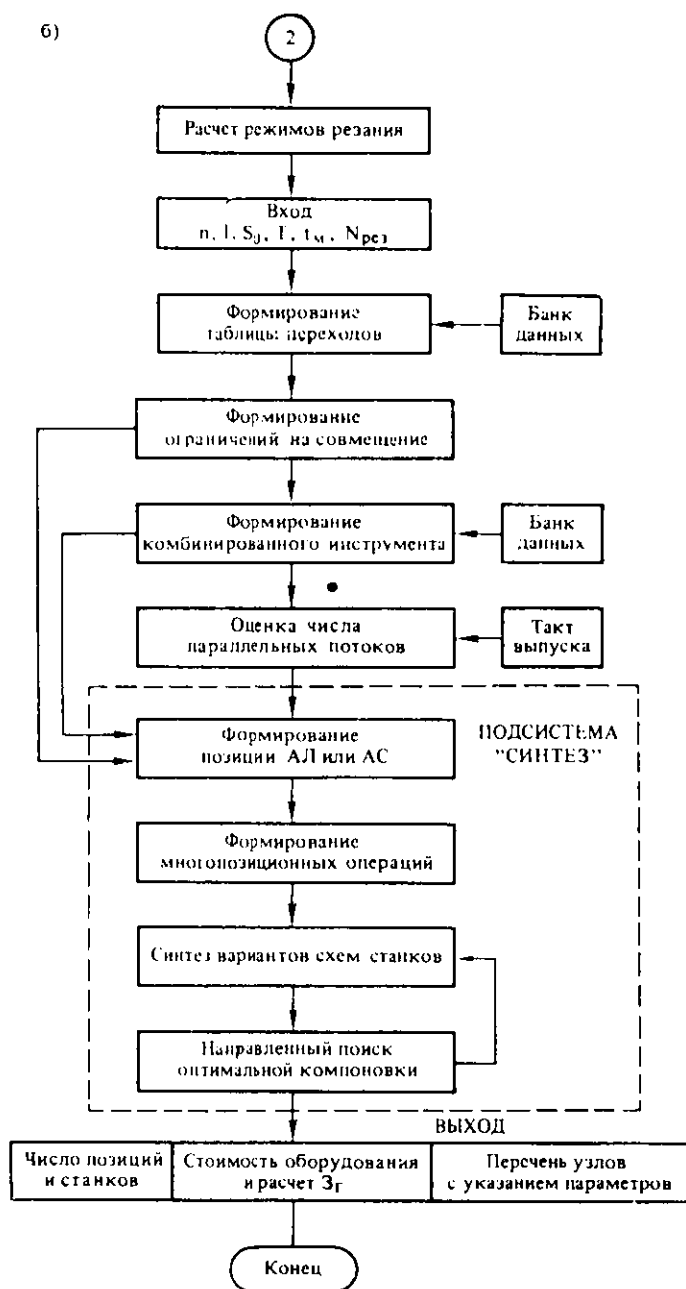


Рис. 4.8. Последовательность проектирования

6)



схем агрегатного оборудования

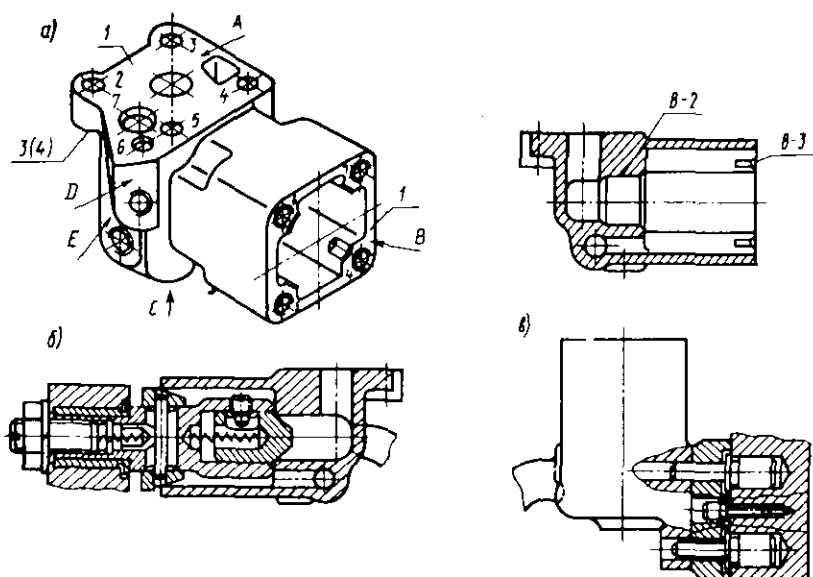


Рис. 4.9. Корпус фильтра грубой очистки масла:

а — общий вид и разрез; б — базирование по черновым базам; в — базирование по чистовым базам

ный способ базирования. Правила формирования отношений частичной упорядоченности называется *ограничениями последовательности*.

Применение последовательной обработки одной поверхности (сверление — развертывание), пересечение поверхностей, близкое их расположение (два отверстия с малым межосевым расстоянием) приводят к ограничениям совмещения ЭТП. Если некоторая группа ЭТП не может выполняться на одной позиции, то не может совмещаться и любая совокупность этих переходов. В исходной информации об ограничениях совмещения достаточно указать перечень минимальных подмножеств из x , выполнение которых на одной позиции запрещено. Обозначим множество таких подмножеств через $Y = \{y_k\}$, $k = 1, \dots, m$. Для корпуса фильтра грубой очистки в табл. 4.5 перечислены номера ЭТП, которые связаны с данными ограничениями последовательности и ограничениями совмещения.

Формализованная постановка задачи проектирования технологического маршрута формируется следующим образом: используя отношения частичной упорядоченности, заданные на множестве X и множестве Y , правила формирования которого описаны выше, требуется разбить рациональным образом исходное множество X на ряд строго последовательных подмножеств z_α ($\alpha = 1, \dots, M$), удовлетворяющих условиям:

$$\forall \alpha_i, \alpha_j, z_{\alpha_i} \cap z_{\alpha_j} = \Phi; \quad (4.1)$$

$$\bigcup z_a = x; \quad (4.2)$$

$$\forall \alpha_1, \alpha_2 \exists x_i, x_j: x_i \in z_{\alpha_1}, \quad x_j \in z_{\alpha_2}, \quad x_i \rightarrow x_j, \quad \alpha_2 < \alpha_1; \quad (4.3)$$

$$\bar{\exists} \alpha, k: y_k \in z_\alpha. \quad (4.4)$$

Выражение (4.1) означает, что каждый переход выполняется строго на одной позиции; (4.2) — все переходы должны быть выполнены; (4.3) — распределяет ЭТП по позициям, исходя из ограничений последовательности; (4.4) — на одной позиции выполняются только совместные переходы.

На первом этапе проектирования формируется матрица F :

$$F = \{f_{ij}\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n_1, \quad (4.5)$$

где

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если переход } x_i \text{ выполняется ранее } x_j, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Исходные данные для построения матрицы F для корпуса фильтра берутся из табл. 4.5 (3-й столбец).

Используя метод Демукрона, множество ЭТП X разбивают на упорядоченные подмножества L_g ($g = 1 \dots s$) — уровни, удовлетворяющие условию (4.3). В уровень L_g могут попасть несовместимые ЭТП, поэтому на втором этапе проектирования уровни L_g ($g = 1 \dots s$) переформируются в позиции z_α ($\alpha = 1 \dots r$), удовлетворяющие условиям (4.1) — (4.4). В первой позиции могут выполняться ЭТП из L_1 , так как они не имеют предшествующих. Из совокупности ЭТП, выделенных для анализа с целью формирования позиций, образуется множество M . Первоначально $M = L_1$. Отобранные в M ЭТП могут выполняться в одной позиции, если между ними нет ограничений совмещения (4.4).

Ниже приводится алгоритм распределения ЭТП по позициям стационарной системы.

Первоначально $\alpha := 1$.

1-й шаг. Из сформированного множества M выделяется подмножество N таких ЭТП, которые могут совмещаться только с переходами из M или с ЭТП, ранее отобранными в позиции. Если $N = \Phi$, то выполняется 3-й шаг.

2-й шаг. В множестве M ищется максимальное по совмещению подмножество переходов, которое и образует z_α , а α присваивается новое текущее значение $\alpha := \alpha + 1$ и осуществляется переход на 4-й шаг.

3-й шаг. Для ЭТП, попавших в N , требуются отдельные позиции, причем между этими переходами нет ограничений (4.3). В этом случае множество N разбивается на минимальное число подмножеств N_β ($\beta = 1 \dots d$), из которых формируются позиции $z_\alpha, z_{\alpha+1}, \dots, z_{\alpha+d-1}$, а α присваивается новое текущее значение $\alpha := \alpha + d$.

Таблица 4.5. Ограничения на последовательность выполнения и на совмещение ЭТП

№ ЭТП	Перечень следующих за x_i элементарных технологических переходов	Перечень несовместимых с x_i элементарных технологических переходов
1	2—14, 16—19, 21—24, 27—30	—
2	21—24	1
3	21—24	1
4	6, 21—24	1
5	7, 21—24	1, 8—11
6	21—24	1, 4
7	21—24	1, 5, 8—11
8	21—24	1, 5, 7, 9—11
9	10, 11, 21—24	1, 5, 7, 8
10	11, 21—24	1, 5, 7—9
11	21—24	1, 5, 7—10
12	13, 14, 16—19, 27—30	—
13	14, 16—19, 27—30	12
14	—	12, 13, 16—19, 27—30
15	25	—
16	14, 27—30	1, 12, 13
17	14, 27—30	1, 12, 13
18	14, 27—30	1, 12, 13
19	14, 27—30	1, 12, 13
20	26	—
21	—	1—7
22	—	1—7
23	—	1—7
24	—	1—7
25	—	15
26	—	20
27	—	1, 12—14, 16—19
28	—	1, 12—14, 16—19
29	—	1, 12—14, 16—19
30	—	11—14, 16—19

4-й шаг. Поскольку часть ЭТП из M отобрана в позиции, M дополняется теми ЭТП из уровня L_2 , которые не имеют ограничений, (4.3) с ЭТП из M . Соответственно в L_2 помещаются те ЭТП из L_3 , которые не имеют ограничений в L_2 . Таким же образом перераспределяются ЭТП в уровнях $L_4, L_5, \dots, L_p$.

5-й шаг. Если $M = \Phi$, то выполняется 1-й шаг.

Для решения задачи 2-го шага вводятся Булевы переменные и полагается

$$\left. \begin{aligned} y_i &= 1, \text{ если переход } X_i \text{ включается в позицию;} \\ y_i &= 0, \text{ если переход } x_i \text{ не включается в позицию.} \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

На переменные y_i накладываются ограничения совмещения (4.4)

$$\{\bar{y}_{k_1} + \bar{y}_{k_2} + \dots + \bar{y}_{k_{n+1}} = 1\}, \quad n = 1 \dots m, \quad (4.7)$$

означающие, что ЭТП $x_{k_1}, x_{k_2}, \dots, x_{k_{n+1}}$ нельзя совмещать в одной позиции. Количество ограничений вида (4.7) равняется числу подмножеств y_h , составляющих исходную информацию об ограничениях совмещения. Знак « $\wedge$ » означает операцию логического сложения.

Пусть n — число ЭТП в M , а $F = \{y\}$, где $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ — вектор с Булевыми компонентами.

Требуется найти

$$\max_{y \in E} f(y) = \max \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.8)$$

при ограничениях вида (4.7).

Эта задача является задачей целочисленного программирования, для решения которой применяется метод ветвей и границ.

На 3-м шаге второго этапа требуется из множества ЭТП N сформировать минимальное количество позиций. Данная задача решается с помощью метода Магу.

На рис. 4.10 изображен граф G_1 , вершины которого, расположенные в одном столбце, образуют уровни $L_1, L_2, \dots, L_5$. После применения второго этапа для корпуса фильтра грубой очистки получается граф G_2 распределения ЭТП по позициям станочной системы.

Используя классификационные признаки обрабатываемого оборудования по степени концентрации операций (см. рис. 4.4) и решая последовательно описанную задачу проектирования процесса для каждого класса агрегатного оборудования, получаем различные варианты технологического маршрута с максимальной степенью концентрации операций в каждом классе. На рис. 4.11 приводится схема компоновки агрегатного станка

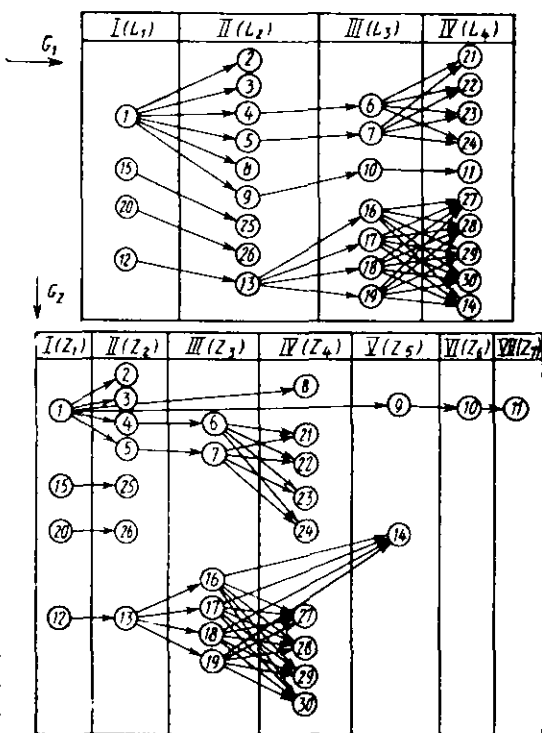


Рис. 4.10. Графы маршрутов обработки корпуса

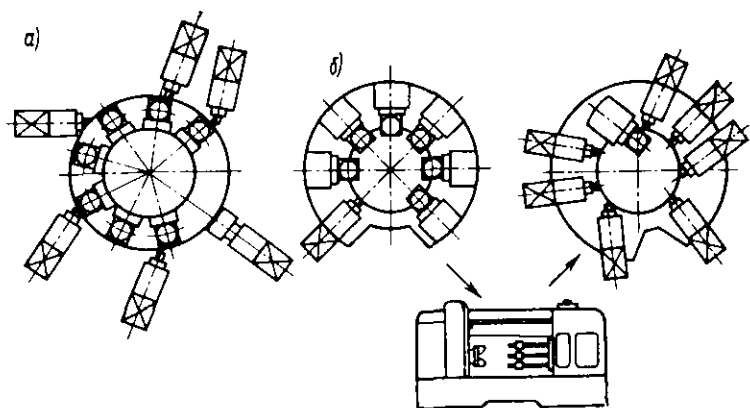


Рис. 4.11. Схемы компоновки станков для составления маршрута обработки корпуса:

а — предложения в результате расчета; б — действующее оборудование

на основании полученного графа G_2 . Для сравнения (рис. 4.11) приведена схема планировки оборудования, действующего на производстве технологического процесса, который реализуется на трех станках: восьмипозиционном агрегатном станке, четырехпозиционном токарном полуавтомате и шестипозиционном агрегатном станке. Простое сравнение приведенных (рис. 4.11) схем станков показывает, что в заводском варианте используется 15 силовых узлов вместо 13 по предлагаемому варианту, два поворотных стола вместо одного, дополнительно токарный полуавтомат, и, кроме того, в три раза больше рабочих. Оценка вариантов по критерию приведенных затрат Z , дает следующий результат для годовой программы выпуска N_r : — 250 000: действующий вариант — $Z_1 = 195\ 000$ руб. Предлагаемый вариант — $Z_2 = 28\ 200$ руб. Следовательно, рациональное проектирование процесса выгодно. Положенный в основу методики принцип концентрации операций оказывает наибольшее влияние на выбор оптимального технологического процесса.

Изложенная методика разделена на два этапа, что позволяет применять ее при проектировании маршрутов обработки корпусных деталей практически любой сложности, так как решаемые на каждом этапе задачи не обладают большой размерностью. Применение же процедуры направленного поиска гарантирует получение рационального технологического маршрута.

Выбор структурно-компоновочных схем станочных систем в условиях неопределенности. При расчете приведенных затрат на обработку годовой программы выпуска деталей необходимо учитывать большое количество параметров для каждого варианта построения станочной системы (заданная программа выпуска и качество детали, станком-

кость, трудоемкость, себестоимость ее обработки, производительность, надежность, стоимость оборудования, режимы резания, технические характеристики агрегатных узлов и др.). Поскольку оценка критерия оптимизации должна производиться на стадии проектирования станочной системы, многие из параметров, от которых он зависит, могут быть рассчитаны лишь приближенно. Вследствие этого с достаточной степенью достоверности может быть определен лишь интервал, в котором находится значение критерия. Очевидно, что в этих условиях за оптимальные могут быть приняты недостаточно эффективные варианты построения станочной системы. Результат оптимизации будет зависеть от того, какие значения определяющих параметров выбраны при расчете, поэтому в реальных условиях проектирования задачу оптимизационного синтеза целесообразно решать в вероятностной постановке, оценивая каждый разрабатываемый вариант станочной системы не детерминированным, а случайным значением критерия оптимизации и опираясь при сравнении вариантов между собой на вероятностные характеристики распределений значения критерия (математические ожидания, дисперсии и т.п.).

Дадим формальную постановку задачи оптимизации в условиях неопределенности *. Имеются вероятностные альтернативы $a_1, a_2, \dots, a_n$ (варианты построения станочной системы) и минимизируемый критерий оптимизации y (приведенные затраты). Каждую вероятностную альтернативу зададим плотностью распределения

$$f_{a_i}(y) : \int_{-\infty}^{\infty} f_{a_i}(y) dy = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.9)$$

которая позволяет определить возможные значения критерия оптимизации и их вероятности по формуле

$$P \{y \leq \tilde{y}_i \leq y + dy\} = f_{a_i}(y) dy. \quad (4.10)$$

Здесь $\tilde{y}_i$ — случайное значение критерия оптимизации i -й вероятностной альтернативы.

Требуется установить отношения предпочтения между альтернативами $a_1, a_2, \dots, a_n$ и определить оптимальную альтернативу.

В теории принятия решений для сравнения вероятностных альтернатив используется понятие детерминированного эквивалента, т. е. такого детерминированного значения критерия оптимизации, которое эквивалентно совокупности возможных значений случайной величины критерия, задаваемой плотностью распределения (4.9).

* См.: Дашенко А. И., Межов А. Е. Оптимизация структурной схемы станочной системы в условиях неопределенности // Машиноведение. 1985. № 4. С. 103—106.

Рассмотрим наиболее распространенный случай, когда плотность распределения (4.9) задана нормальным законом

$$f_{a_i}(y) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (4.11)$$

В этом случае распределение возможных значений критерия оптимизации полностью характеризуется его средним m_i и дисперсией σ_i^2 .

Определим детерминированный эквивалент $\hat{y}_i$ вероятностной альтернативы a_i как такие средства, которыми надо располагать, чтобы затраты $\hat{y}_i$ на реализацию альтернативы a_i не превосходили величины $\hat{y}_i$ с вероятностью $p > 0$, т. е.

$$\hat{y}_i: P\{\bar{y}_i \leq \hat{y}_i\} = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\hat{y}_i} e^{-\frac{(y-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} dy = p. \quad (4.12)$$

Очевидно, что значение $\hat{y}_i$ для каждой альтернативы, а значит и отношения предпочтения между альтернативами зависят от величины P . Значение вероятности P выбирается субъективно, исходя из разумных соображений, которые можно сделать при сравнении двух альтернатив.

Пусть m_i, m_j — средние значения, σ_i^2, σ_j^2 — дисперсии критерия оптимизации двух вероятностных альтернатив a_i и a_j соответственно. Пусть плотности распределения f_{a_i} и f_{a_j} задаются формулой (4.11), а F_i, F_j соответствующие функции распределения

$$F_i(y) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{(y-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} dy \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4.13)$$

Тогда в соответствии с (4.12) детерминированные эквиваленты альтернатив a_i и a_j будут

$$y_i: F_i(\hat{y}) = P, \quad \hat{y}_j: F_j(\hat{y}) = P. \quad (4.14)$$

Сделав замену переменной в (4.13), можно получить

$$F_i(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{y-m_i}{\sigma_i}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{y-m_i}{\sigma_i}\right), \quad (4.15)$$

где $\Phi(\cdot)$ — интеграл вероятностей. Таким образом,

$$y_i: \Phi\left(\frac{\hat{y}_i-m_i}{\sigma_i}\right) = P - \frac{1}{2}; \quad y_j: \Phi\left(\frac{\hat{y}_j-m_j}{\sigma_j}\right) = P - \frac{1}{2}. \quad (4.16)$$

Отсюда следует, что при выборе детерминированных эквивалентов в соответствии с определением (4.12) и при нормальных законах распределения критерия оптимизации вероятностных альтернатив должно выполняться равенство

$$\frac{\hat{y}_i - m_i}{\sigma_i} = \frac{\hat{y}_j - m_j}{\sigma_j} = \alpha \quad \text{const}; \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (4.17)$$

где α — удовлетворяет уравнению

$$\Phi(\alpha) = P - 1/2, \quad (4.18)$$

т. е.

$$y = m + \alpha\sigma, \quad (4.19)$$

и может определяться для любого P по таблицам интеграла вероятностей.

Таким образом, детерминированный эквивалент вероятностей альтернативы, определяемый формулой (4.12), является линейной функцией среднего и среднеквадратического отклонения значений критерия оптимизации, а выбор вероятности P эквивалентен выбору величины α в формуле (4.18). При $\alpha = 0$, $P = 1/2$ и $\hat{y} = m$, т. е. сравнение альтернатив проводится только по среднему значению критерия оптимизации. Если $\alpha = 0$, то при сравнении альтернатив учитывается и разброс величины критерия оптимизации около среднего значения.

При $m_i = m_j$ и $\sigma_i^2 < \sigma_j^2$ разумно считать, что a_i предпочтительнее, т. е. предпочтительна альтернатива с меньшей дисперсией при одинаковых средних значениях. Это значит, что меньшей дисперсии должен соответствовать меньший детерминированный эквивалент. В соответствии с (4.18) это требование выполняется, если $\alpha > 0$, а тогда из (4.19) получается $P > 1/2$. В табл. 4.6. приведены некоторые значения $P \geq 1/2$ и $\alpha \geq 0$, удовлетворяющие уравнению (4.19). Рис. 4.12 иллюстрирует, как производится сравнение вероятностных альтернатив в наиболее интересном случае $m_i < m_j$ и $\sigma_i > \sigma_j$.

Если $P = P^* > 0,5$, то альтернативы a_i и a_j эквивалентны ($\hat{y}_i = \hat{y}_j$). Если $P > P^*$, то, как видно из рис. a_j предпочтительнее a_i ($\hat{y}_j < \hat{y}_i$). Наконец, если $0,5 < P < P^*$, то a_i предпочтительнее a_j ($\hat{y}_i < \hat{y}_j$).

Заметим, что вероятность P можно трактовать как надежность, с которой, располагая средствами, равными величине детерминированного эквивален-

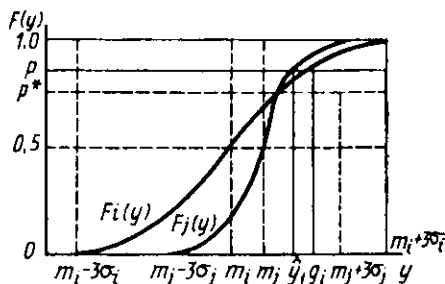


Рис 4.12. Сравнение вероятностных альтернатив

Т а б л и ц а 4.6. Варианты обработки корпуса насоса

Состав оборудования	$T_{ц_i}$	$B_{ин_i}$	$T_{ф_i}$
1. 10-позиционный АС	0,62	0,180	---
2. 7-позиционный АС	0,53	0,151	0,62
3. РС	0,33	0,015	---
1. 12-позиционный АС с центральной колонной для обработки детали в две установки	0,55	0,264	0,74
2. РС	0,33	0,015	0,37
1. 7-позиционный АС с многошпиндельными головками	1,30	0,074	0,54
2. То же, 4-позиционный	0,91	0,036	0,54
3. РС	0,33	0,015	0,37
1. 10-позиционный АС с центральной колонной многошпиндельными револьверными головками	1,32	0,098	1,13
2. РС	0,33	0,015	0,37
1. АЛ из двух многопозиционных агрегатных станков с автоматическими загрузочными устройствами	0,58	0,263	0,40
2. РС	0,33	0,015	0,37

Примечание. АС — агрегатный станок, РС — расточный станок, АЛ — автоматиче

та, $\hat{y}_i$, можно осуществить альтернативу (построить i -й вариант станочной системы).

Применим предлагаемый подход к выбору оптимальной структурной схемы станочной системы для обработки корпуса насоса гидроусилителя руля автомобиля при годовой программе выпуска 10^6 , $2,5 \cdot 10^6$, $5 \cdot 10^6$ шт. Эта задача на детерминированной основе была решена в работе [10] методом направленного поиска. Учитывая результат этой работы, рассмотрим для сравнения только варианты, дающие близкие к минимуму значения приведенных затрат. Эти варианты и исходные данные по ним приведены в табл. 4.6. Для расчета критерия оптимизации воспользуемся формулой третьего уровня оценок (см стр. 60) для приведенных затрат

$$Z = N_r (\delta + \beta) s_{ст} \sum_{i=1}^M T_{ф i} + N_r (\delta + \beta) \Delta s_{ин} \sum_{i=1}^M \times$$

гидроусилителя руля автомобиля и их основные параметры

A_i , тыс. руб.	$\frac{\Delta A_i \cdot 100\%}{A_i}$	a_i			$\bar{z} \pm \Delta z$		
		10^5	$2,5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	10^6	$2,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
54	10	1	1	2	—	—	—
40	10	1	1	2	38,6±	46,3±	85,9
13,5	10	1	1	1	3,9	4,6	±8,6
75,0	50	1	1	2	32,1±	42,6±	31,4±
13,5	10	1	1	1	12,00	12,00	22,7
46,0	20	1	2	3	34,4±	60,2±	103,4±
32,0	20	1	1	2	4,8	7,4	11,8
13,5	10	1	1	1	—	—	—
72,0	40	1	2	4	33,0±	66,4±	129,0±
13,5	10	1	1	1	8,6	16,7	33,1
120,0	15	1	1	2	41,7±	49,9±	96,2±
13,5	10	1	1	1	5,3	5,3	10,2

ская линия.

$$\times B_{ин_i} T_{ц_i} + (E_n + \alpha) \sum_{i=1}^M A_i a_i; \quad (4.20)$$

$$a_i = \frac{N_{\Gamma} T_{ц_i} (1 + \sum B_i)}{F_{\Gamma}}; \quad (4.21)$$

$$\sum B_i = (B_{об_i} + B_{ин_i} + B_{ож. н_i}) \gamma. \quad (4.22)$$

Многие параметры, служащие для определения приведенных затрат, рассчитываются приближенно, поэтому и значение приведенных затрат, полученное по формуле, можно рассматривать лишь как среднее значение. Фактические приведенные затраты при осуществлении данного варианта обработки детали могут отклоняться от расчетных на большую или меньшую величину в зависимости от характера проектируемого оборудования. Ошибки будут незначительными, если

данный вариант обработки предусматривает использование модулей и отдельных агрегатов, уже опробованных в эксплуатации, производящихся длительное время, конструкции которых отработаны. И наоборот, ошибки в определении приведенных затрат будут значительными, если проектируемое оборудование специальное, не имеющее аналогов в действующем производстве.

Наибольшее влияние на величину приведенных затрат в (4.20) оказывает стоимость станков, точное определение которой вызывает наибольшие затруднения при расчете эффективности вариантов обработки. С учетом сделанных выше замечаний в табл. 4.6 приведены возможные отклонения стоимости оборудования (в процентах), а также расчеты среднего значения затрат и отклонения от среднего для разных годовых программ выпуска деталей.

Считая, что в интервале рассеяния приведенные затраты распределены по нормальному закону, и принимая $\Delta Z = 3\sigma$, можно вычислить среднеквадратические отклонения приведенных затрат от среднего значения. Затем по формуле (4.18) вычисляются значения детерминированных эквивалентов приведенных затрат для разных уровней надежности и разных годовых программ. Результаты оптимизации приведены на рис. 4.13 и в табл. 4.7, 4.8. В первой строке табл. 4.8. приведены отношения предпочтения между вариантами, полученные только из сравнения средних значений приведенных затрат. Для всех рассмотренных программ выпуска деталей самым эффективным оказывается вариант 2, при этом $Z_{мин} = 32,1$. Вторая строка табл. 4.8 показывает, что отношения предпочтения между вариантами не изменяются при небольших уровнях надежности P (при незначительном учете влияния рассеяния затрат на эффективность вариантов). При $P = 0,90$ и $P = 0,99$ в зависимости от программы становятся наиболее эффективными варианты 1 и 3. Таким образом, отдается предпочтение вариантам, несколько худшим по средним затратам, но со значительно меньшей дисперсией. При таком выборе риск ошибки при практической реализации варианта оказывается наименьшим.

Приведенный пример показывает важность оценки ошибок приближенных расчетов на стадии проектирования станочных систем и учета этих ошибок при сравнении эффективности вариантов систем.

Агрегатирование переналаживаемых станочных систем. Современное серийное и крупносерийное производство выдвигает требования создания переналаживаемых производственных систем, сочетающих

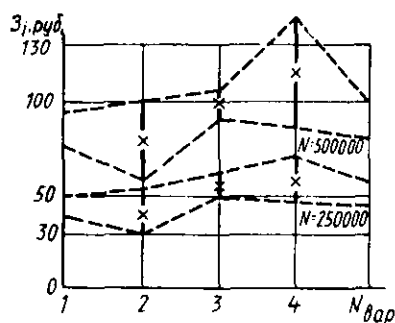


Рис. 4.13. Интервалы значений приведенных затрат для различных вариантов станочной системы

Таблица 4.7. Значения детерминированных эквивалентов приведенных затрат для разных вариантов

Р	а	Варианты					$N_p \cdot 10^4$
		1	2	3	4	5	
0,50	0	38,6	32,1	34,4	33,0	41,7	1
		46,3	42,3	60,6	66,2	49,9	2,5
		85,9	81,4	103,4	129,0	96,2	5
0,70	0,53	39,3	34,2	35,2	34,5	42,6	1
		47,1	44,7	61,5	69,4	50,8	2,5
		87,4	85,4	105,5	134,8	98,0	5
0,90	1,29	40,3	37,2	36,4	36,7	43,5	1
		48,3	47,7	63,4	73,5	52,1	2,5
		89,6	91,1	108,4	143,1	100,5	5
0,99	3,0	42,5	44,1	39,2	41,6	47,0	1
		50,9	54,6	67,6	83,2	55,2	2,5
		94,5	104,1	115,2	162,1	106,4	5

Таблица 4.8. Результаты оптимизации в условиях неопределенности

Р	а	Отношения предпочтения между вариантами					$N_p \cdot 10^4$
0,50	0	2	4	3	1	5	1
		2	1	5	3	4	2,5
		2	1	5	3	4	5
0,70	0,53	2	4	3	1	5	1
		2	1	5	3	4	2,5
		2	1	5	3	4	5
0,90	1,29	3	4	2	1	5	1
		2	1	5	3	4	2,5
		1	2	5	3	4	5
0,99	3,0	3	4	1	2	5	1
		1	2	5	3	4	2,5
		1	2	5	3	4	5

в себе гибкость и высокую производительность. Такие системы, предназначенные для обработки группы близких по конструкции и технологии обработки деталей с достаточно большими годовыми программами выпуска, наиболее целесообразно создавать, основываясь на методе концентрации операций и принципе агрегатирования. При этом гиб-

кость системы достигается путем смены инструментов и инструментальных блоков, перестройки силовых головок станков, переналадки (или замены) приспособлений для закрепления деталей, транспортных систем и систем управления.

Задачи оптимального проектирования ТСМ для серийного производства значительно сложнее задач массового производства, рассмотренных выше. Широкое применение блочно-модульного принципа построения систем, применение сменных многошпиндельных коробок, переналаживаемых манипуляторов и роботов для загрузки, транспортировки и разгрузки деталей, использование программируемых контроллеров (ПК) для изменения циклов управления работой оборудования и компьютеров для управления процессом в целом создают условия эффективного использования метода высокой концентрации операций не только в массовом, но и в серийном производстве, однако не снимает с повестки дня задачу поиска оптимальных вариантов технологических процессов и схем построения ТСМ.

Рациональный уровень концентрации операций в этих условиях зависит от программ выпуска деталей группы. Расчеты, проведенные для одной группы из десяти корпусных деталей, показывают (см. рис. 2.1), что при разных программах выпуска эффективной является обработка деталей на станках с различным уровнем концентрации операций. С увеличением программ выпуска деталей увеличивается и оптимальный уровень концентрации операций, становятся эффективными более сложные компоновки оборудования, основанные на многошпиндельной и многопозиционной обработке.

Таким образом, и в условиях групповой обработки важна проблема синтеза оптимальной структуры гибкой станочной системы для конкретной группы деталей с заданными годовыми программами выпуска.

Многообразие типов производств от мелкосерийного, где очень широка и неустойчива номенклатура деталей, предназначенных для обработки на проектируемой станочной системе, до крупносерийного, где деталь или группа деталей должны производиться в больших количествах и в течение длительного времени, а возможные изменения в конструкциях деталей незначительны, обуславливает различные принципы построения переналаживаемых и гибких станочных систем, различные уровни их универсальности, концентрации операций и производительности, различные организационные принципы их работы.

Проблема синтеза компоновочных схем станочных систем для условий серийного производства включает в себя следующие задачи

- 1) выделение из общего множества деталей ряда групп, для которых будут создаваться ТСМ;
- 2) разработка группового технологического маршрута обработки деталей;
- 3) генерирование необходимого множества вариантов структурно-компоновочных схем станочных систем, различающихся по степени концентрации операций;

4) оценка эффективности вариантов и разработка метода оптимизации, приемлемого для решения задач технологического проектирования переналаживаемых станочных систем.

Группирование деталей для обработки на переналаживаемых линиях. Поскольку число различных деталей, образующих группу, и программа выпуска каждой из них существенно влияют на схему построения линии для групповой обработки, рассмотрим метод рационального группирования деталей.

При создании переналаживаемых ТСМ на этапе разработки технического задания на их проектирование типичными являются три ситуации: а) мелкосерийное производство деталей требует применения широко универсального оборудования типа «обрабатывающий центр» в значительной степени инвариантного к конструкциям деталей и технологии их обработки; б) серийное и крупносерийное производство деталей, обработка которых ведется по групповой технологии и для реализации этой технологии создается гибкое одно-и многоинструментное оборудование по агрегатно-модульному принципу; в) то же, но в условиях, когда оборудование имеется, а групповой технологический процесс должен базироваться на возможностях уже приобретенных станков.

Во втором и третьем случаях актуальна задача предварительного группирования деталей по конструктивно-технологическим признакам. Правильное группирование существенно влияет на технико-экономическую эффективность применения ТСМ путем более полного использования станков, а при агрегатно-модульном построении целиком определяет структурно-компоновочные схемы оборудования. Поэтому одной из главных проблем первоначального этапа создания переналаживаемых линий является оптимальное разбиение множества деталей на группы и построение оптимального группового техпроцесса.

Главное отличие разработанного метода группирования деталей — поэтапное генерирование вариантов групповой обработки с учетом возможностей различных типов переналаживаемых станков, классифицированных по принципу концентрации элементарных технологических переходов (от одношпиндельных обрабатывающих центров до многопозиционных гибких линий с многоинструментной обработкой на каждой позиции), и экономическая оценка результатов группирования применительно к основным структурным схемам рассматриваемого оборудования.

Группирование деталей в ГПС характеризуется определенными особенностями. Во-первых, необходимость обеспечить гибкость производственной системы, как тактическую, так и стратегическую. Тактическая гибкость определяет оперативную многовариантность действующего на данный момент технологического процесса, а стратегическая требует прогнозирования изменения конструкции изделий во времени. Гибкость системы в большой степени влияет на качество группирования. Во-вторых, отсутствие четкой границы между деталями разных групп в ГПС, «размытость» групп определяется тем, что в ГПС обра-

батываются детали широкой номенклатуры и их четкое группирование по конструктивно-технологическим признакам осуществить трудно и нецелесообразно.

Прежде всего необходимо уделять внимание на самых ранних стадиях технологического проектирования, т. е. на этапе группирования деталей, вопросам обеспечения заданного чертежом качества деталей. Оно должно базироваться на классификации обрабатываемых поверхностей и типовых наборах (модулях) методов обработки, обеспечивающих заданную точность и параметры шероховатости. Таким образом, по каждой детали обработка каждой поверхности задается типовым набором технологических переходов.

В связи с тем что решение этой задачи группирования всегда ведется в условиях неполной определенности, целесообразно использовать теорию нечетких («размытых») множеств.

Представим каждую деталь как элемент n -мерного векторного пространства R^n , причем координате векторов деталей отвечает наличие определенного технологического перехода их обработки*. Группирование рассматривается как создание нечетких областей в пространстве, которые содержат подобные детали. Каждая такая нечеткая область является нечеткой группой и характеризуется своим центром группирования, который представляет обобщающая деталь, т. е. условная деталь, содержащая технологические переходы всех деталей группы. Поэтому координаты этого центра определяют все технологические переходы, которые содержатся в группе.

Каждая группа отображается нечеткой решеткой (упорядоченным сетевым множеством — графом технологических операций). Узлы решетки — это технологические операции, которые соответствуют определенному типу оборудования (по классификации, рис. 2.4). Каждый узел решетки оценивается экономическим критерием, например приведенными затратами на годовой выпуск продукции и кодом, соответствующим типу применяемого оборудования. Таким образом, решетки — это совокупность возможных групповых маршрутов обработки, каждый из которых имеет свою экономическую оценку, что позволяет выбрать наиболее эффективный вариант.

Рассмотрим подробнее метод группирования.

Исходными данными для группирования деталей являются:

номенклатура обрабатываемых деталей, программа выпуска и, если возможно, прогноз изменения их конструкции за срок службы оборудования;

совокупность типовых технологических переходов для обработки каждой детали.

Группирование является первым шагом в процессе технологического проектирования ПАЛ и всегда связывается с выбором оборудо-

* См.: Васильев В. Н., Дашенко А. И., Рачев Ц. М. Группирование деталей и оптимизация структуры ГПС // Вестник машиностроения. 1988. № 5. С. 34—38.

вания. На начальном этапе типы и схемы компоновок оборудования определяются упрощенно, затем компоновки станков и их параметры, включая стоимость и надежность, постепенно уточняются. На этапе группирования деталей рассматриваются основные структурные схемы модулей и ПАЛ (рис. 4.14):

К I — гибкая ячейка, построенная на основе однопозиционного станка типа обрабатывающего центра;

К II — гибкая ячейка, построенная на основе многопозиционного переналаживаемого станка;

К III — сложная гибкая система, состоящая из нескольких ячеек первого и второго типа.

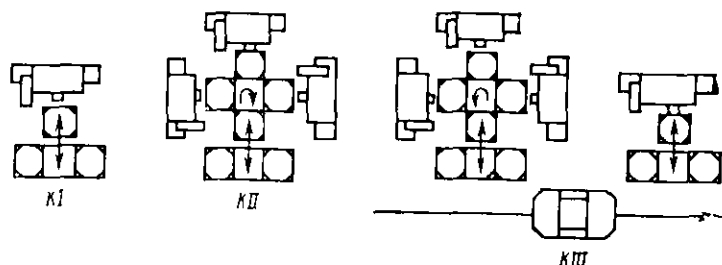


Рис. 4.14. Классы структурных схем агрегатированного оборудования для гибких станочных систем по степени концентрации операций

В процессе группирования детали целесообразно представлять в формализованном виде. Каждую изображают при помощи ее функциональной модели, позволяющей описать на формальном языке ее конструктивно-технологические особенности. При этом имеются в виду только те качества детали, которые являются носителями значимой информации для построения групп. Исходя из заданного качества обработки поверхностей, сгруппируем все множества последовательных технологических переходов, необходимых для полной обработки деталей (они уже определены на предварительном этапе). Совокупность всех последовательных переходов, которые описывают множество рассматриваемых деталей, представим как фактор технологических переходов

$$P_j = \{n_1, n_2, \dots, n_n\},$$

где P_j ($j = 1, 2, \dots, k$) — технологические переходы; n — размерность вектора.

Тогда в зависимости от того, какими переходами описывается данная деталь, представим ее вектором B_i :

$$B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}\},$$

где b_{ij} — коэффициенты присутствия технологического перехода в процессе обработки детали B_i , причем

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если переход } p_j \text{ присутствует;} \\ 0, & \text{если перехода нет.} \end{cases}$$

Этот способ описания деталей определяет их пространство существования как евклидово пространство R^n с размерностью, определяющейся размерностью вектора технологических переходов n . Таким образом, каждую деталь можно представить как точку n -мерного векторного пространства технологических переходов с целочисленными координатами на интервале $[0,1]$. Группирование рассматривается как процесс определения «покрытия» пространства из областей, содержащих только подобные детали.

Подобие деталей характеризуем нечетким отношением подобия r , определенным в пространстве R^n . Отношение подобия r между двумя деталями равно 1, когда множества технологических переходов, которые их описывают, полностью совпадают, и равно 0, когда нет ни одного перехода, который являлся бы общим. Подобие r определяется как

а) рефлексивное, если

$$\forall B_i \in R^n : r(B_i, B_i) = 1;$$

б) симметричное, если

$$\forall (B_i, B_j) \in R^n : r(B_i, B_j) = r(B_j, B_i).$$

Таким образом, нечеткие множества подобных деталей G в пространстве существования R^n образуют группы только тогда, когда выполняются условия:

$$\text{а) } \mu_G(B_i) = 1 \Rightarrow \mu_G(B_j) = r(B_i, B_j);$$

$$\text{б) } |\mu_G(B_i) - \mu_G(B_j)| \leq 1 - r(B_i, B_j),$$

где $\forall B_i \in R^n$ — квантор общности для всякого $B_i \in R^n$; $\in$ — знак принадлежности; $r(B_i, B_j)$ — функция подобия деталей B_i и B_j ; B — вектор представления упорядоченного множества переходов i -й детали; G — нечеткая группа деталей; $\mu_G(B_i)$ — функция, характеризующая степень принадлежности детали B_i к нечеткой группе G . Как r , так и μ_G изменяются в интервале $[0,1]$.

При таком определении группы условие «а» характеризует группу как множество подобных деталей. Деталь, у которой степень принадлежности к группе равна 1, является прототипом группы или комплексной деталью. Вектор ее представления определяет групповую последовательность технологических переходов.

Условие «б» по существу является условием непрерывности и свидетельствует о том, что функция подобия распространяется на множество деталей, и детали, нечетко группированные в одной группе, должны быть максимально подобными друг другу.

Рассмотрим выборочное множество деталей D , определенное в пространстве R^n . Основная идея, которая используется при группировании деталей в D , заключается в том, что группы образуются заменой совокупностей точек, характеризующих отдельные детали, комплексной деталью (не обязательно соответствующей одной из реальных деталей). Затем степень подобия между исходными точками-деталью и этой комплексной деталью подсчитывается по формуле

$$\mu_G(B_i) = 1 - \frac{e^2(B_i, G)}{n},$$

где G — вектор, описывающий комплексную деталь указанным выше способом, а $e^2(B_i, G)$ — евклидова норма векторов B_i и G .

На каждом этапе группирования формируется новая структура групп деталей с помощью объединяющих покрытий. Таким образом, на каждом итеративном шаге уменьшается число групп на одну и затем снова выполняется перегруппирование деталей. Группирование начинаем с определения первого объединяющего покрытия выборочного множества деталей D , которое представляет собой совокупность нечетких подмножеств. Каждому нечеткому подмножеству G_i на первом шаге соответствует одна деталь как элемент множества D . Эти объединяющие покрытия обозначим как $F^k(D) = \{G_i\}_{i=1}^{n-k}$, где D — начальное множество деталей $F^k(D)$ -е объединяющее покрытие множества X ; k — шаг группирования.

В каждом объединяющем покрытии определяем отношение подобия r^k , которое является расширением отношения подобия r . Оно оценивает соответствие каждой двух групп, которые описываются своими комплексными деталями.

Областью определения r^k является закрытый интервал $[0, 1]$. Чтобы перейти от k -го к $(k+1)$ -му шагу группирования, необходимо определить те две группы, которые максимально подобны (т. е. коэффициент r^k подобия между ними максимален). Затем определяем новый центр группирования, как центроид этих двух групп. Таким образом, число групп уменьшается на 1. Необходимо отметить, что при группировании учитывается ряд других факторов (например, суммарная станкоемкость обработки групп, число деталей в каждой группе и т. д.). Это диктуется необходимостью создания таких групп, у которых эти характеристики были бы примерно одинаковыми. После определения $(k+1)$ -го покрытия множества D все детали группируются вокруг новых прототипов групп, при этом соблюдается условие максимума коэффициента подобия.

Пусть группа G получена на k -м шаге группирования деталей и характеризуется вектором прототипа:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\},$$

где g_j выражают степени принадлежности каждого технологического перехода n_j к данной группе деталей. Так как Π — упоря-

доченное множество, то этот порядок сохраняется и в множестве G , т. е.

$$g_1 > g_2 > \dots > g_n.$$

Здесь $>$ — знак упорядоченности элементов.

В технологии машиностроения операция является основной частью технологического процесса и характеризуется неизменностью объекта обработки, оборудования и рабочих-операторов. В процессе ее проектирования наиболее полно решается комплекс технико-экономических задач, направленных на создание рациональных условий достижения технических требований, предъявляемых к изделию. Критериями оценки вариантов проектируемой операции являются штучное время обработки детали или себестоимость, т. е. величины, которые уменьшаются при сокращении числа переходов, при одновременном их выполнении, при совмещении элементов основного и вспомогательного времени.

Пусть L — операционная решетка, с помощью которой представим множество всех возможных технологических операций данной группы деталей. Определим функцию отображения Γ множества технологических переходов группы деталей в операционной решетке, которая поставит в соответствие каждому нулевому элементу g_i вектора технологических переходов группы G элемент $x_j \in L$. Этот элемент x_j обозначим $r(g_i)$. При этом сохраняется условие упорядоченности

$$\forall (g_i, g_j) \in G : g_i \geq g_j \Rightarrow L : \Gamma(g_i) \geq \Gamma(g_j),$$

т. е. Γ является морфизмом.

Решетку L назовем *операционной технологической решеткой*, если она состоит из множества упорядоченных технологических операций, каждая из которых является образом одного или нескольких последовательно выполняемых технологических переходов из G . При определении множества возможных технологических операций сначала определяются все последовательные переходы, которые можно объединить в общей технологической операции.

Рассмотрим пример, представленный на рис. 4.15. Множество состоит из четырех ненулевых технологических переходов, выполняе-

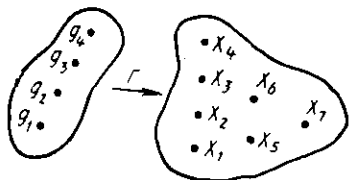


Рис. 4.15. Построение операционной решетки для группирования деталей

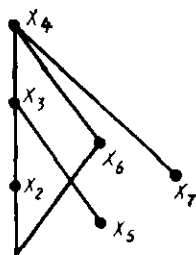


Рис. 4.16. Диаграмма маршрутных цепей операционной решетки

мых в определенном порядке. Переходы g_1 , g_2 , и g_3 допускают объединение в одной операции. Обозначаем:

$$G = \{g_1, g_2, g_3, g_4\}.$$

Тогда операционная решетка определяется следующим образом:

$$L = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\},$$

где x_j — элемент операционной решетки, представляющий технологическую операцию

$$x_1 = \Gamma(g_1); \quad x_5 = \Gamma(g_1, g_2); \quad x_7 = \Gamma(g_1, g_2, g_3).$$

$$x_2 = \Gamma(g_2); \quad x_6 = \Gamma(g_2, g_3);$$

$$x_3 = \Gamma(g_3);$$

$$x_4 = \Gamma(g_4);$$

Узлы решетки L охватывают всевозможные варианты генерирования технологических операций для обработки деталей группы G .

Чтобы определить групповые технологические маршруты, введем по аналогии с понятием максимальной цепи в теории решеток понятие маршрутной цепи. Маршрутная цепь M — это цепь в операционной решетке, которая отображает множество всех технологических переходов в G , т. е. является его покрытием. Маршрутные цепи строятся исходя из следующих условий:

$$1) M = U_j x_j (x_j \in L);$$

$$2) M = \Gamma\{g_1, g_2, \dots, g_n\}, \quad \forall g_i \in G;$$

$$3) \Gamma(g_i) = x_j \in M \Rightarrow \Gamma(g_i) \neq x_k \quad \forall x_k \in L: k \neq j,$$

которые в формализованном виде определяют маршрутные цепи.

Диаграммой маршрутных цепей назовем неориентированный обычный граф, который составлен из всех маршрутных цепей данной решетки. На рис. 4.16 представлена диаграмма маршрутных цепей для решетки из рассмотренного примера. С помощью диаграммы определяется множество всех возможных технологических маршрутов обработки деталей данной группы. Каждому узлу в цепях сопоставляется число обрабатывающих единиц оборудования (исходя из показанной на рис. 4.14 классификации) и вычисляется величина приведенных затрат по формуле

$$Z_i = (\delta + \beta) S \sum_j T_{ij} N_j + (E + \alpha) a_j A_i.$$

Таким образом, решая задачу об оптимальной цепи по минимуму суммарных затрат

$$Z_{\Sigma} = \sum_i Z_i \rightarrow \min,$$

определяем оптимальный технологический маршрут для каждой группы деталей.

Группирование может продолжаться до тех пор, пока все детали не объединились в одной группе (предельный случай). Затем строится функция суммарных затрат для всех вариантов группирования и определяется тот вариант, при котором эта функция имеет минимум. Алгоритм группирования представлен на рис. 4.17. Таким образом, после конечного числа шагов, количество которых не может быть больше, чем число наименований деталей, выбирается оптимальный вариант группирования и соответствующие этому варианту структурные схемы оборудования.

Метод позволяет решать и обратную задачу, когда оборудование существует и необходимо обработать множество новых деталей. Тогда группирование осуществляется по тому же способу. Поскольку оборудование существует, решетки не строятся, но представляются своими оптимальными технологическими маршрутами, описывающими существующую технологию. На каждом этапе группирования строится ото-

бражение групповых векторов технологических переходов в маршрутной цели. Для этих вариантов определяют необходимые затраты для запуска в производство всех деталей. В конце процесса группирования определяется вариант, при котором функция суммарных затрат имеет

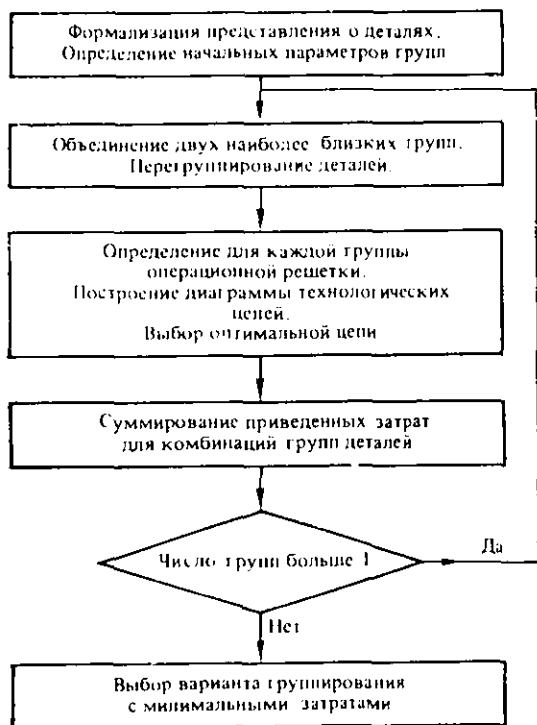


Рис. 4.17. Увеличенная блок-схема метода нечеткого группирования деталей

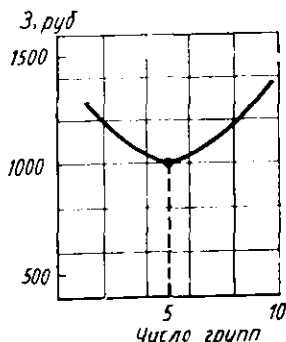


Рис. 4.18. Зависимость суммарных затрат на обработку деталей от варианта группирования

свой минимум. Этот вариант группирования, реализованный на имеющемся оборудовании, является решением обратной задачи.

Пример. Задано множество из двадцати корпусных деталей. Их обработка характеризуется последовательными технологическими переходами (табл. 4.9).

Таблица 4.9. Матрица технологических переходов для исходного множества деталей

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Φ_1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Φ_2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
Φ_3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
Св	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$Зк_1$	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
$Зк_2$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Р	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
$Рс_1$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$Рс_2$	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0
С	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
Нр	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1

Φ_1 и Φ_3 — фрезерование; Р — развертывание;
 Св — сверление; $Рс_1$, $Рс_2$ — растачивание;
 $Зк$ — зенкерование; С — снятие фаски.
 Нр — нарезание резьбы;

Известны времена обработки и годовые программы выпуска деталей. После применения метода нечеткого группирования получена функция суммарных приведенных затрат, представленная на рис. 4.18. Результаты синтеза оптимальных технологических маршрутов показывают, что минимальные затраты получаются при варианте разбиения множества на пять групп. Тогда суммарные затраты 1,05 тыс. руб., в то время как, например, для варианта из двух групп затраты 1,15 тыс. руб., а для варианта из девяти групп — 1,32 тыс. руб.

Результаты группирования деталей по пяти группам представлены в табл. 4.10. Расчет выполняется компьютером с выводом на графопостроитель результатов формализованного изображения деталей для каждой группы с обозначением обрабатываемых поверхностей. Состав деталей первой группы оптимального варианта показан на рис. 4.19. Минимум затрат на обработку этой группы деталей обеспечен оборудованием типа КП (см. рис. 4.18).

Т а б л и ц а 4.10. Оптимальный вариант группирования деталей

№ группы	Число деталей	Станкостоемость, ч	№ детали
1	4	10273,33	1, 2, 4, 16
2	4	4703,33	2, 18, 19, 20
3	4	14550,00	5, 7, 8, 17
4	3	3773,34	6, 9, 11
5	5	7054,67	10, 12, 13, 14, 15

Таким образом, группирование деталей формирует необходимые условия выбора оптимальных структурно-компоновочных схем станков для ГПС, создаваемых по агрегатно-модульному принципу, или позволяет наиболее эффективно использовать уже имеющееся гибкое оборудование за счет наибольшего соответствия требований технологического процесса технологическими возможностями станков.

Синтез схем переналаживаемых линий и ТСМ. Исходной информацией для проектирования оптимальных структурно-компоновочных схем служат чертежи выбранной группы деталей (см. группу на

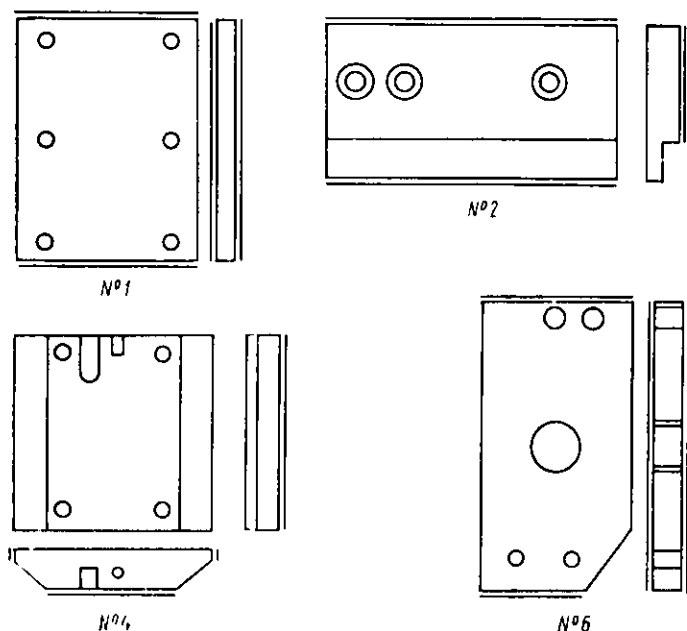


Рис. 4.19. Пример компьютерного изображения в формализованном виде группы № 1 деталей оптимального варианта

Примечание. Обрабатываются все отверстия, пазы и отмеченные дополнительной линией плоскости

рис. 4.20) и технологические маршруты их обработки. Групповой технологический маршрут состоит из элементарных технологических переходов, необходимых для обработки всех деталей группы.

Формулы для расчета затрат на групповую обработку

1-й уровень оценок

$$Z^I = \sum_{j=1}^n Z_j = \sum_{j=1}^n \left[N_j (\delta + \beta) s_{\text{ст}} \sum_{i=1}^n T'_{\phi ij} + (E_n + \alpha) \frac{F_j}{F_n} \sum_{i=1}^M A_{ij} a'_i \right]; \sum B_{ij} = 0; F_j = \frac{N_j T'_j}{\sum_{i=1}^n N_j T_i} F_n;$$

$$T'_j = \max_{i=1,2,\dots,M} T'_{ij}; a_{ij} = \left\lfloor \frac{N_i T'_{ij}}{F_j} \right\rfloor + 1,$$

$$a_i = \max_{j=1,2,\dots,n} a_{ij},$$

2-й уровень оценок

$$Z^{II} = \sum_{i=1}^n Z_j = \sum_{j=1}^n \left[N_j (\delta + \beta) s_{\text{ст}} T'_{\phi ij} + (E_n + \alpha) \frac{F_j}{F_n} \sum_{i=1}^M A_{ij} a'_i \right];$$

$$\sum B'_{ij} = (B'_{об ij} + B'_{ин ij} + B'_{нал ij});$$

$$T'_{\phi ij} = \frac{T'_{ij} (1 + \sum B_{ij})}{f_{ij}}; F_j = \frac{N_j T'_j (1 + \sum B'_{ij})}{\sum_{j=1}^n N_j T_j (1 + \sum B'_{ij})} F_n;$$

$$T_j = \max_{i=1,2,\dots,M} T'_{ij}; a_{ij} = \left\lfloor \frac{N_j T'_{ij} (1 + \sum B'_{ij})}{F_j} \right\rfloor + 1,$$

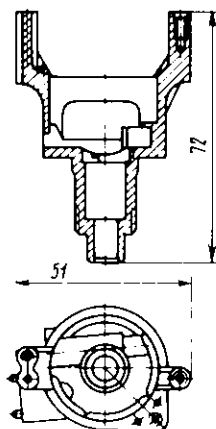
$$a_i = \max_{j=1,2,\dots,n} a_{ij}; B'_{нал ij} = \frac{L T'_{нал ij}}{N_j T_{ij}};$$

3-й уровень оценок

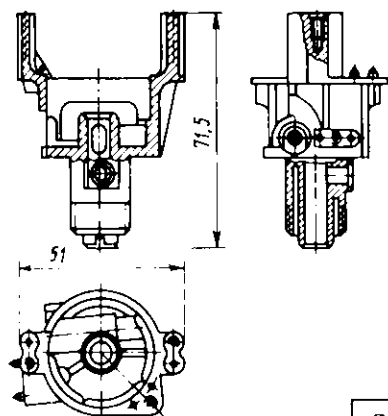
$$Z^{III}(\Pi_l) = \sum_{j \in \Pi_l} \left\{ N_j (\delta + \beta) \sum_{i=1}^M \left[(T_{\phi ij} s_{\text{ст}} + B_{ин ij} T_{ij} \Delta s_n) + \frac{\alpha A_i + H_i}{N_j} a_i \right] + E_n \sum_{i=1}^M A_i a_i \right\};$$

$$\sum B_{ij} = (B_{об ij} + B_{ин ij} + B_{ож ij}) \gamma;$$

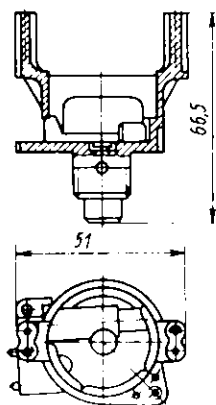
$$T_{\phi ij} = \frac{T_{ij} (1 + \sum B_{ij})}{f_{ij}}; F_j = \frac{N_j T_j (1 + \sum B_{ij})}{\sum_{j \in \Pi_l} N_j T_j (1 + \sum B_{ij})} F_n;$$



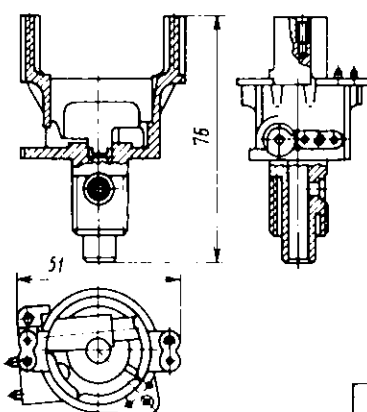
1



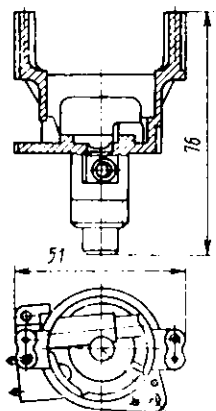
2



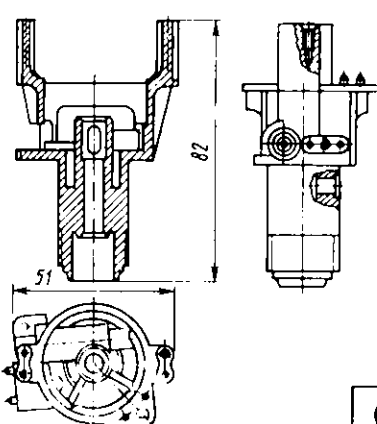
3



4



5



6

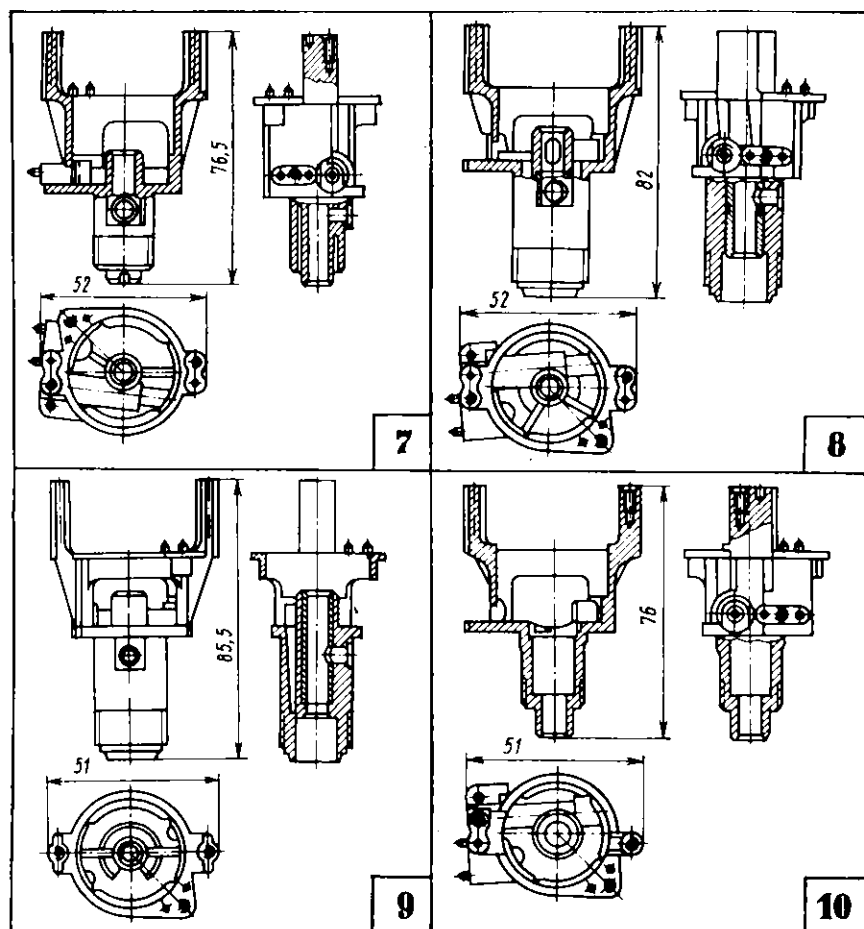


Рис. 4.20. Группа деталей, предназначенных для обработки на гибкой станочной линии

$$T_j = \max_{i=1,2,\dots,M} T_{ij}; \quad a_{ij} = \left\lceil \frac{N_j T_{ij} (1 + \sum B_{ij})}{F_j - L T_{\text{нал } ij}} \right\rceil + 1;$$

$$a_i = \max_{j \in \Pi_i} a_{ij}; \quad Z_{\Sigma}^{III} = \sum_{i=1}^p Z^{III}(\Pi_i).$$

Обозначения: i — номер станочной операции (номер станка); j — номер детали; M — число станочных операций для полной обработки группы деталей; n — число деталей в группе; N_j — годовая программа выпуска j -й детали, шт.; F_d — действительный годовой фонд времени работы системы, мин; F_j — часть годового фонда

времени, отводимая на обработку j -й детали, мин; T_{ij} (T'_{ij}) — время цикла i -го станка, имеющего групповую (простейшую i') компоновку для j -й детали, мин/шт.; T_j (T'_j) такт выпуска j -й детали гибкой технологической системой (технологической системой для обработки только j -й детали), мин/шт.; a_{ij} — количество станков i -го вида (простейшей компоновки) для обработки j -й детали в течение времени F_d ; q_i — количество станков i -го вида для обработки группы деталей в течение времени F_d ; f_{ij} — коэффициент многостаночного обслуживания; $T_{\Phi ij}$ ($T'_{\Phi ij}$) — трудоемкость обработки j -й детали на i -м станке, имеющем групповую (простейшую) компоновку, мин/шт.; A_{ij} — стоимость одного станка i -го вида в простейшей компоновке, предназначенной для обработки только j -й детали, руб.; A_i — стоимость одного станка i -го вида в групповой компоновке, руб.; Z_j — приведенные затраты на обработку годовой программы выпуска j -й детали в течение времени F_j , руб.; E_n 0,15 ... 0,20 — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; α — коэффициент амортизационных отчислений; δ 1,15 — коэффициент заработной платы с начислениями; β — общие накладные расходы в долях заработной платы, включающие в себя расходы на текущий ремонт оборудования; H_i — стоимость годовой эксплуатации инструмента на i -м станке, руб; T_{zij} — время, затрачиваемое станочником на непосредственное обслуживание станка, включающее в себя активное наблюдение за его работой, мин; $s_{ст}$ — зарплата станочника, руб/мин; s_n — зарплата наладчика, руб/мин; Δ 1,3 ... 1,6 — коэффициент, учитывающий занятость наладчика предварительной настройкой инструментов и наблюдением за работой станка; ΣB_{ij} ($\Sigma B'_{ij}$) — сумма удельных (отнесенных к 1 мин работы станка) потерь времени на устранение отказов механизмов $B_{обij}$ ($B'_{обij}$), замену инструментов $B_{инij}$ ($B'_{инij}$), ожидание наладчиков $B_{ожij}$ ($B'_{ожij}$) при обработке j -й детали на i -м станке в групповой (простейшей) компоновке; $T_{нал ij}$ ($T'_{нал ij}$) — потери времени на одну наладку i -го станка на обработку j -й детали, определяемые по групповой (простейшей) компоновке; P_l — l -я подгруппа деталей; p — число подгрупп; $Z(P_l)$ — приведенные затраты на обработку l -й подгруппы деталей, руб.; ΣZ — приведенные затраты на обработку всей группы деталей.

Множество вариантов структурно-компоновочных схем ПАЛ генерируется по групповому технологическому маршруту на основе классификации структурных схем агрегатного оборудования по степени концентрации операций (рис. 4.14). Система классификации является развитием приведенной на рис. 4.4 и содержит все принципиально отличающиеся варианты схем построения станочных систем, которые разделены на три класса:

1) однопозиционные станки — класс К1, позволяющие осуществить первую степень концентрации операций (одно- и многосторонняя обработка деталей в данной позиции одним или несколькими инструментами последовательно, параллельно, параллельно-последовательно);

2) многопозиционные станки (автоматические линии с жесткой связью между станками) — класс КII, вторая степень концентрации операций, осуществляемая при последовательном или параллельно-последовательном объединении на станке или станочной линии ряда позиций обработки детали;

3) автоматические системы из многопозиционных станков или линий с гибкими связями — класс КIII, третья степень концентрации операций. В результате использования этой классификации для группы деталей может быть получено несколько десятков (до сотни) вариантов структурных схем станочных систем для заданной группы деталей.

При оценке каждого варианта необходимо учитывать большое количество параметров, таких, как заданные программы выпуска и качество деталей, станкоемкость, трудоемкость, себестоимость их обработки, производительность, надежность, гибкость и стоимость оборудования, режимы резания, технические характеристики агрегатных узлов и др., трудности в получении объективной информации об этих параметрах на стадии проектирования. Наличие многих критериев для оценки эффективности вариантов и недостаточная проработанность зависимостей этих критериев от определяющих параметров делают чрезвычайно трудоемким детальное рассмотрение и сравнение по эффективности даже небольшого числа вариантов. Для решения задачи оптимизации в этих условиях использован также метод направленного поиска, который является развитием изложенного выше метода синтеза непереналаживаемых систем. Метод направленного поиска включает в себя:

а) алгоритм «ветвления», т. е. разбиение исходного множества вариантов на подмножества, каждое из которых при необходимости разбивается на более мелкие подмножества и т.д.;

б) методику оценки «перспективности» каждого из подмножеств разбиения и выбора «перспективного» для дальнейшего разбиения подмножества, которое с наибольшей вероятностью содержит оптимальный вариант.

В качестве критерия эффективности вариантов также используются приведенные затраты (см. выше «Формулы расчета критерия оптимальности») на годовой выпуск продукции, вычисляемые с разной степенью приближения в зависимости от того, на каком этапе «ветвления» производится оценка эффективности. Для оценки «перспективности» рассматриваемого подмножества по определенному правилу выбирается вариант — представитель (наиболее эффективный из вариантов подмножества) и вычисляются приведенные затраты, которые при указанных условиях будут нижней оценкой для приведенных затрат по всем вариантам подмножества. Перспективным для дальнейшего разбиения считается то подмножество, для которого нижняя оценка приведенных затрат является наименьшей. Кроме того, для успешного функционирования метода необходимо, чтобы нижняя оценка одного и того же варианта изменялась только в сторону

увеличения по мере углубления процесса «ветвления» (увеличения количества шагов оптимизации). Это достигается путем увеличения числа учитываемых при вычислении приведенных затрат факторов (путем более детальной проработки вариантов — представителей подмножеств). При этом дополнительные факторы должны в меньшей степени влиять на приведенные затраты по сравнению с основными, уже учтенными ранее.

Рассмотрим применение этого метода для синтеза оптимальных структурно-компоновочных схем гибких станочных систем.

Групповая обработка приводит к ряду особенностей функционирования станочной системы:

а) станочная система для обработки группы деталей сложнее станочной системы для обработки одной детали или любой из деталей группы;

б) времена циклов и загрузка отдельных станков зависят от вида обрабатываемых деталей, что приводит к увеличению простоев станков из-за несинхронности их работы и припуска обработки некоторых деталей (если отсутствует склад и процесс построен по поточному методу);

в) необходимость переналадок станочной системы при смене вида обрабатываемой детали.

Эти особенности приводят к необходимости учета дополнительных факторов при вычислении приведенных затрат на обработку всех деталей групп и более точного расчета действительно нижних оценок для каждого из рассматриваемых подмножеств вариантов. В частности, для объективного сравнения конкурирующих вариантов необходимо оптимальное решение частных задач, таких, как выбор величины партии деталей и частоты переналадок, выбор последовательности запуска деталей, минимизирующей затраты времени на переналадку, и др.

Рассмотрим этапы метода направленного поиска.

1-й шаг. В соответствии с классификацией схем (см. рис. 2.4) все множества вариантов разбивается на три класса. По определенному правилу выбираются варианты — представители каждого класса и вычисляются приведенные затраты на годовой выпуск деталей группы по самым приближенным формулам исходя из 100% надежности станков, отсутствия потерь времени на переналадки и затрат на инструмент. При подсчете трудоемкости обработки каждой детали и капитальных затрат исходим из простейших компоновок станочной системы, не учитывая стоимости тех элементов структурно-компоновочных схем, которые не используются при обработке данной детали (сило-вые головки, отдельные позиции многопозиционных станков и т.п.). Это позволяет получить действительные нижние оценки приведенных затрат для каждого класса.

При подсчете количества станков на каждой станочной операции необходимо учесть снижение их загрузки из-за несинхронности работы и незанятости обработкой некоторых деталей группы. Для этого

проводится распределение годового фонда времени между деталями группы в соответствии со станкоемкостями их обработки и годовыми программами выпуска:

$$F_i = \left[N_j T'_{ij} / \sum_{i=1}^n N_i T'_i \right] F_{\text{д}}. \quad (4.23)$$

Если обозначить T_{ij} — время цикла i -го станка (в простейшей компоновке) при обработке j -й детали, можно получить

$$a_{ij} = [N_j T'_{ij} / F_j] + 1 \quad (4.23a)$$

— количество станков i -го вида, необходимых для обработки j -й детали в течение времени F_j , а

$$a_i = \max_{1 \leq j \leq n} a_{ij}$$

— количество станков для обработки всех деталей в течение времени $F_{\text{л}}$.

Таким образом, приведенные затраты на обработку всех деталей группы в течение года можно подсчитать как сумму приведенных затрат на обработку каждой из деталей в течение времени F_j по формуле

$$З = \sum_{j=1}^m \left[N_j (\delta + \beta) \cdot s_{\text{ст}} \cdot \sum_{i=1}^M T'_{\phi ij} + (E_{\text{н}} + \alpha) \frac{F_j}{F_{\text{л}}} \sum_{i=1}^M A_{ij} a_i \right].$$

Здесь $T'_{\phi ij}$ — трудоемкость обработки j -й детали на i -м станке в простейшей компоновке (мин/шг.)

$$T'_{\phi ij} = T'_{ij} / f, \quad (4.236)$$

где T_{ij} — время цикла i -го станка при обработке j -й детали, мин; f — коэффициент многостаночного обслуживания.

На основе сравнения оценок эффективности вариантов каждого класса выбирается перспективный класс структурных схем.

2-й шаг. Перспективный класс разбивается на три подкласса, соответствующих последовательной, параллельной и параллельно-последовательной обработке деталей (рис. 4.21). Определяются варианты — представители подклассов. Приведенные затраты рассчитываются по формуле (см. выше формулы расчета критерия оптимизации, 2-й уровень оценок), в которой более точно вычисляются трудоемкости обработки деталей и количество станков путем учета собственных простоев станков из-за отказов механизмов оборудования и замены инструментов, а также потерь времени на переналадку. При этом последние рассчитываются приближенно, исходя из минимальных затрат времени на одну наладку станка на обработку данной детали ($T'_{\text{нал } ij}$), количество L наладок в течение года, определяемого величиной пар-

КПС

а)

$p > l, r > 1$								
$p > l, r = 1$								
$p = l, r > 1$								
$p = l, r = 1$								

Рис. 4.21. Множество возможных вариантов структурных схем классов КІ и КІІ станков для обработки группы из 10 деталей

б)

К I Пр

К I Пр Пр

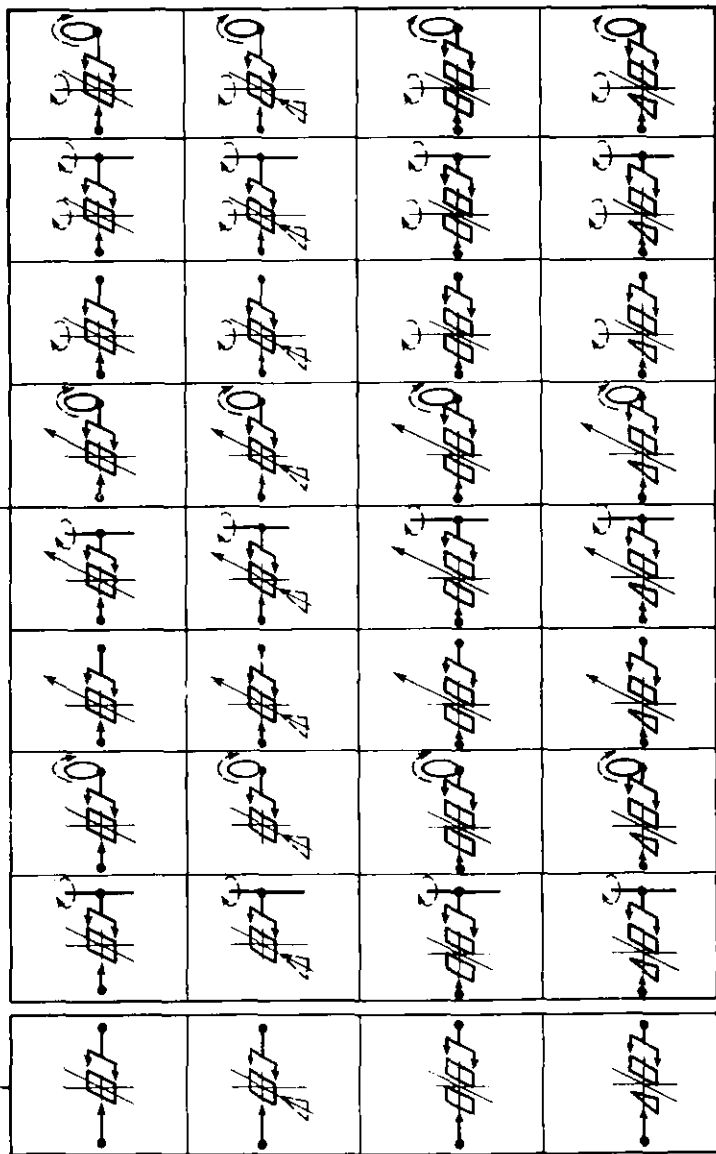


Рис. 4.21. (продолжение)

б)

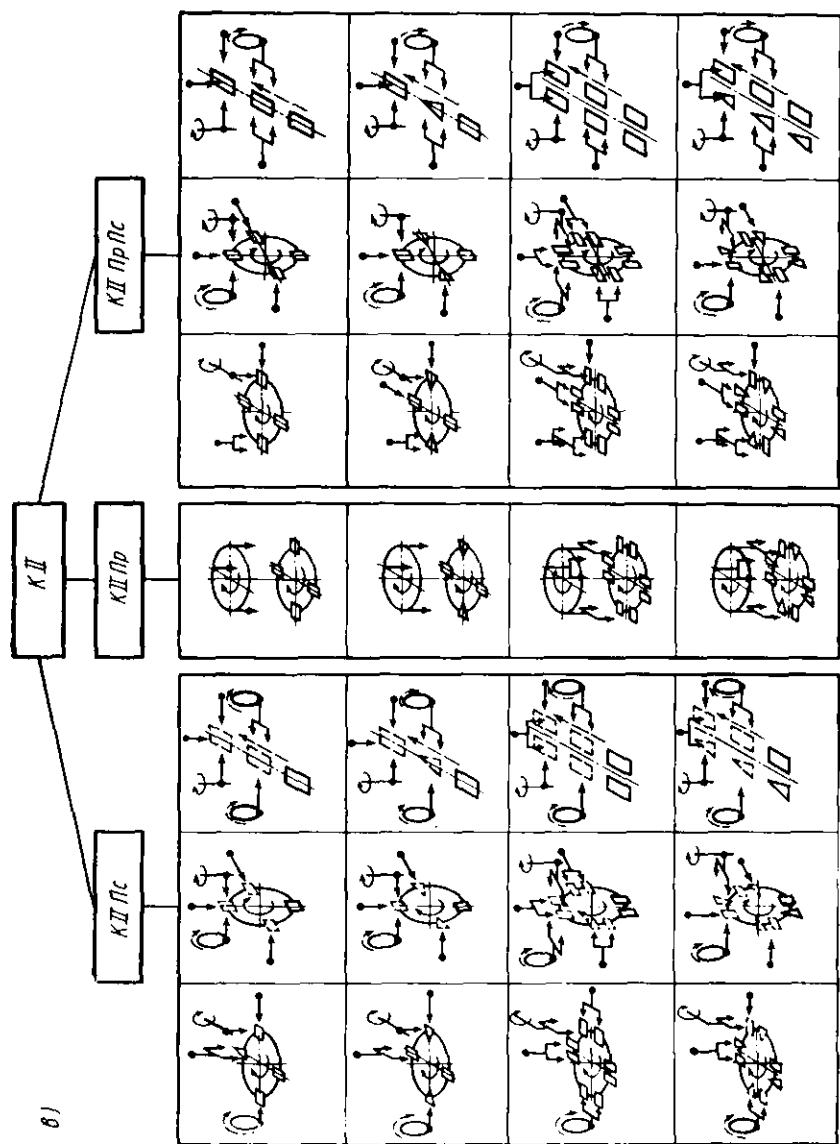


Рис. 4.21. (продолжение)

тии и годовой программой данной детали. Таким образом, вместо формул (4.23а) и (4.23б) используют выражение

$$a_{ij} = \frac{[N_j T'_{ij} (1 + B'_{об\ ij} + B'_{ин\ ij}) + L T_{нал\ ij}]}{F_j} + 1; \quad (4.24)$$

$$T'_{ф\ ij} = T'_{ij} (1 + B'_{об\ ij} + B'_{ин\ ij}) / f, \quad (4.25)$$

где $B'_{об\ ij}$ и $B'_{ин\ ij}$ — удельные потери времени из-за отказов оборудования и замены инструментов.

В результате сравнений вариантов по приведенным затратам выбирается перспективный подкласс схем.

3-й шаг. Для каждого варианта в перспективном подклассе определяется количество параллельных потоков ($p \geq 1$), необходимых для обработки всех деталей группы, которая разбивается на l подгрупп $П_1, П_2, \dots, П_p$ с числом деталей $n_1, n_2, \dots, n_p$ в каждой подгруппе. Детали в подгруппах объединяются таким образом, чтобы обеспечить равномерность загрузки оборудования по потокам, а также максимальное упрощение компоновок станочной системы для обработки деталей подгрупп. Приведенные затраты на обработку всей группы деталей подсчитываются как сумма приведенных затрат на обработку каждой из подгрупп

$$З = \sum_{l=1}^p З_l.$$

Расчет $З_l$ проводим по самым точным формулам (3-й уровень оценок), рассматривая компоновки станков, необходимые для обработки всех деталей подгруппы, и определяя их количество с учетом потерь времени из-за отказов оборудования и замены инструментов, ожидания наладчиков, вследствие наложения простоев, а также из-за переналадок станков

$$a_{ij} = \left[\frac{N_j T_{ij} (1 + B_{об\ ij} + B_{ин\ ij} + B_{о\ ij}) \gamma}{F_j - L T_{нал\ ij}} \right] + 1.$$

При этом $T_{нал\ ij}$ рассчитывают с учетом оптимальной последовательности запуска деталей подгруппы в обработку. Трудоемкость обработки деталей

$$T_{ф\ ij} = t_{a\ ij} (1 + B_{об\ ij} + B_{ин\ ij} + B_{о\ ij}),$$

учитывающей фактическое время занятости станочника обслуживанием станка и активным наблюдением за его работой.

Кроме того, в приведенные затраты включаются зарплата наладчиков и стоимость инструмента. Таким образом,

$$З_{\Sigma} = \sum_{j \in J_l} \left\{ N_j \sum_{i=1}^M [(\delta + \beta) s_{ст} T_{ф\ ij} + B_{ин\ ij} T_{ij} \cdot \Delta \cdot s_{н}] + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^M (E_n + \alpha) A_i + H_i \right\} a_i.$$

Распределение фонда времени между деталями подгруппы рассчитывается по формуле, аналогичной формуле (4.23).

Вариант структурно-компоновочной схемы, для которого приведены затраты минимальны, является оптимальным при условии, что все оценки, полученные на первом и втором этапах, для других вариантов оказываются выше. В противном случае необходимо вернуться к тем подмножествам вариантов, которые имеют нижние оценки эффективности, меньшие Z_{Σ} , и уточнить их по формулам 2-го и 3-го этапов.

Общая схема метода направленного поиска изображена на рис. 4.22.

В заключение рассмотрим пример решения задачи оптимизационного синтеза гибкой станочной системы для группы из десяти подобных по конструкции и технологии обработки деталей (см. рис. 4.20). При отыскании оптимального решения методом направленного поиска пришлось рассмотреть семь из нескольких десятков (рис. 4.21, а, б, в) возможных вариантов структурно-компоновочных схем построения станочной системы (на рисунке их 43), причем только три варианта были подвергнуты детальной проработке. Последовательность решения задачи синтеза схем и оценки приведенных затрат на каждом из этапов поиска приведены на рис. 4.22 и 4.23, оптимальным оказался вариант системы (рис. 4.24) из двух многопозиционных переналаживаемых агрегатных станков, каждый из которых предназначен для обработки одной из двух подгрупп деталей. На эти две подгруппы в процессе поиска была разбита исходная группа деталей. Разбиение было проведено таким образом, чтобы максимально упростить

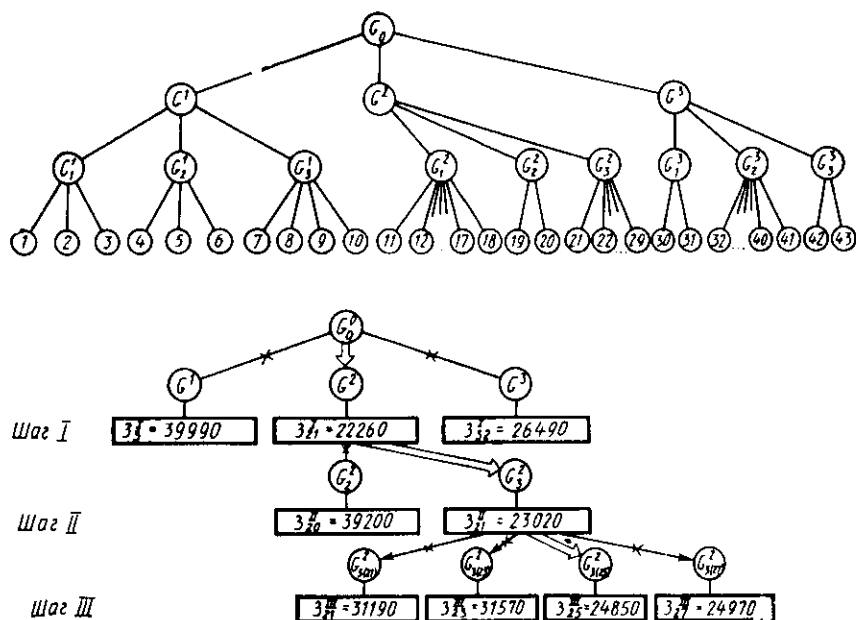


Рис. 4.22. Дерево возможных вариантов (а) и схема направленного поиска оптимального варианта (б)

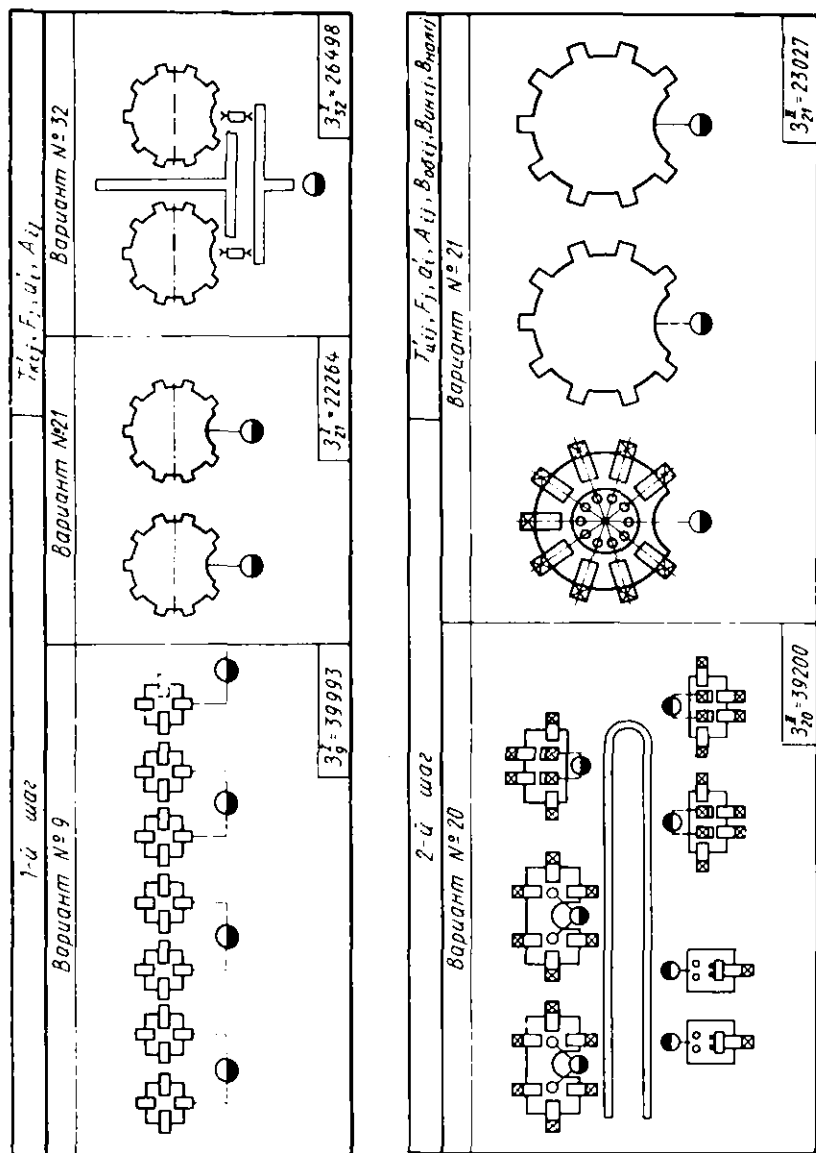


Рис. 4.23. Синтез схем и результаты их оценки на 1-м, 2-м и 3-м шагах оптимизации

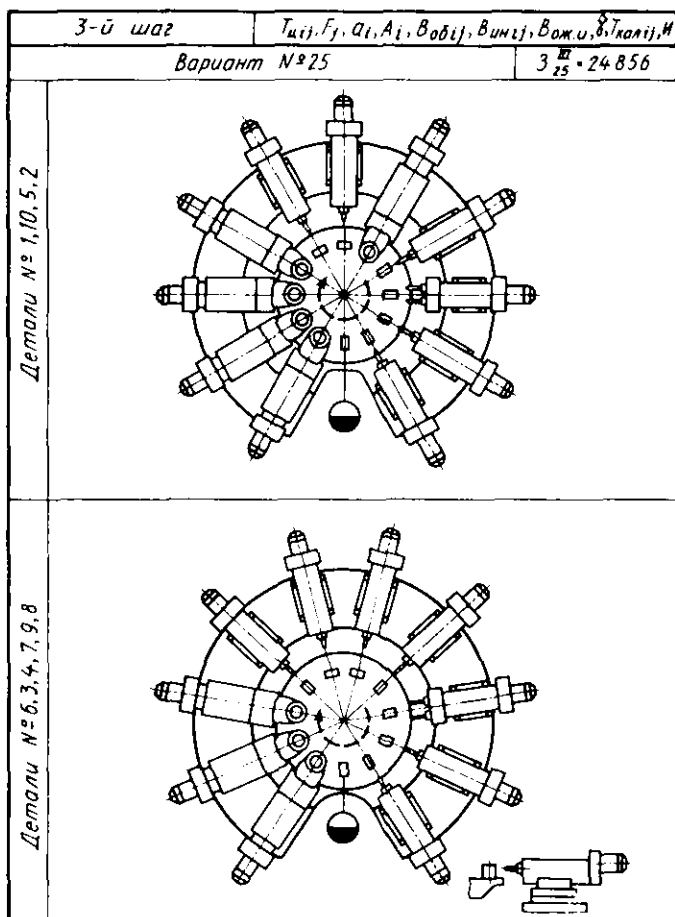


Рис. 4.23. (продолжение)

компоновки станков для обработки каждой из подгрупп, а также обеспечить равномерную загрузку оборудования.

Сравнение эффективности предложенного варианта с действующим дано в табл. 4.11.

Так же как и для задач массового производства, применение метода направленного поиска позволяет резко сократить число вариантов построения станочных систем, которые необходимо анализировать, требует подробной проработки и точной оценки только двух-трех вариантов, близких к оптимальному, позволяет накапливать и обобщать опыт предыдущих решений с целью дальнейшего ускорения разработки оптимальных технологических процессов.

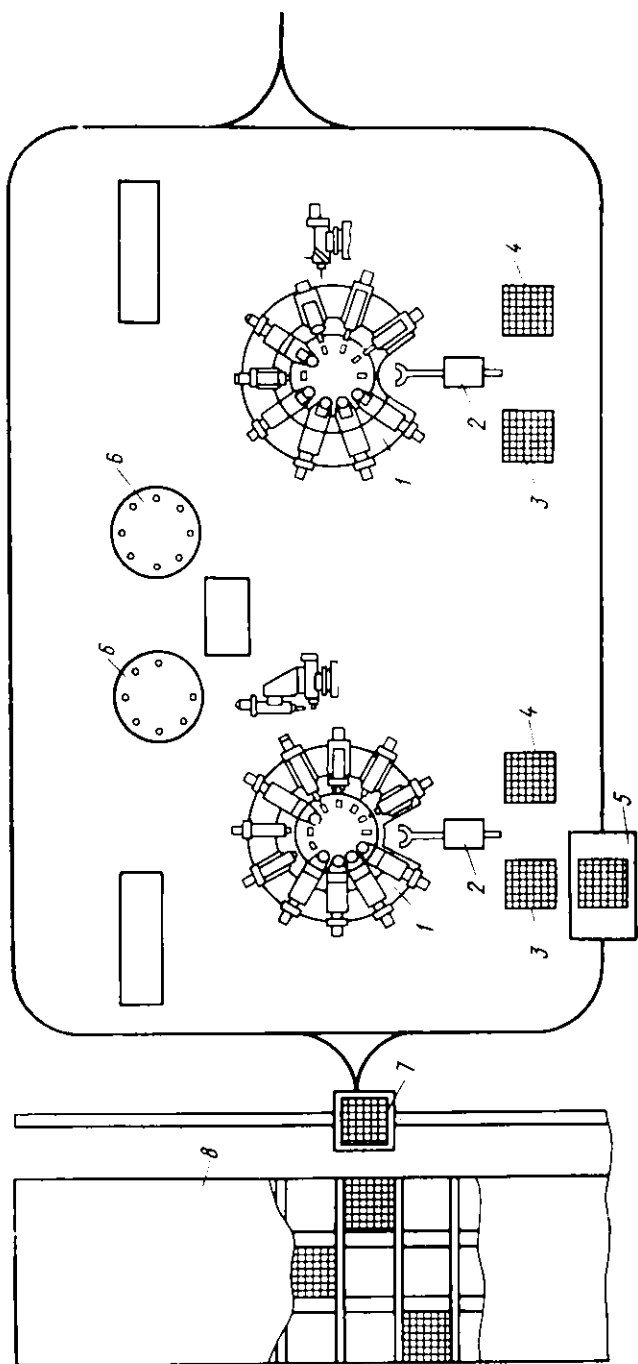


Рис. 4.24. Гибкая система из двух переналаживаемых агрегатных станков для обработки десятков типовых деталей: 1 — многопозиционные агрегатные станки; 2 — роботы; 3, 4 — палеты с заготовками и готовыми деталями; 5 — тележка с электромагнитным управлением; 6 — магазины с режущими инструментами; 7 — штабелер; 8 — склад заготовок

Таблица 4.11. Сравнение двух вариантов обработки группы корпусных деталей

Параметры сравнения	Действующий вариант			Оптимальный вариант	Эффективность меньше
	агрегатные станки	универсальные станки	в сумме		
Число станков на группу	8	5	13	2	В 6,5 раза
Стоимость оборудования, руб. (без средств автоматизации)	159 000	6000	165 000	55 000	В 3 раза
Количество операторов, обслуживающих станки	6	5	11	1	В 11 раз
Себестоимость обработки, руб.	21 705	975	22 680	7387	В 3,1 раза
Площадь, занятая оборудованием	80	20	100	20	В 5 раз

Вместе с тем необходимо дальнейшее развитие работ в области разработки автоматизированной системы проектирования оптимальных схем построения ПАЛ, разработки прикладных программ, которые позволяли бы для заданной группы деталей автоматически проектировать групповой технологический маршрут, генерировать и оценивать технически целесообразные варианты, находить среди них наилучшие по выбранным критериям, оставляя за проектантом право принятия окончательного решения.

§ 4.3. ОПТИМАЛЬНОЕ АГРЕГАТИРОВАНИЕ СБОРОЧНЫХ МАШИН И ЛИНИЙ ДЛЯ МАССОВОГО И СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для обеспечения максимального технико-экономического эффекта при автоматизации сборки каждого изделия необходимо решение комплекса научно-технических задач. Одна из основных задач — разработка метода проектирования оптимальных технологических процессов сборки изделий с применением наиболее эффективного уровня автоматизации, с выбором структурно-компоновочных схем сборочных машин, обеспечивающих заданный выпуск изделий требуемого качества с наименьшими затратами на их производство.

Построение сборочных машин по различным структурно-компоновочным вариантам, которые могут отличаться уровнем концентрации операций, уровнем автоматизации основных и вспомогательных операций сборки, типами рабочих, транспортных подающих и других механизмов и устройств, их различным конструктивным исполнением приводит к тому, что процесс сборки одного и того же изделия может существенно отличаться своими технико-экономическими показателями. Основные из них — это трудоем-

кость сборки и надежность сборочного оборудования, ритмичность его работы, стоимость и занимаемая им производственная площадь, себестоимость сборки.

С учетом специфики процессов сборки при направленном поиске оптимального варианта схем сборочных машин и линий вначале определяем наиболее рациональный уровень автоматизации процесса, а затем класс концентрации операций и оптимальную схему построения сборочной линии.

Решение основано на пошаговом способе оптимизации. В большинстве случаев наилучшее решение находится уже на третьем шаге поиска. Критерии оценки вариантов на каждом из шагов для условий непереналаживаемой сборки рассчитывают по приведенным ниже формулам, которые связывают главные параметры технологического процесса (трудоемкость, производительность, надежность, стоимость оборудования, себестоимость сборки и др.) с затратами Z_j .

Формулы, связывающие главные параметры технологического процесса с затратами

$$Z_j = N_r \sum_{i=1}^M (\delta + \beta) S_{оп. i} T_{ф. i} + \sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot A_i a_i + E_n \sum_{i=1}^M a_i A_i;$$

1-й уровень оценок

$$a_i \geq \frac{T_{ц. i} N_r}{F}; \quad T_{ф. i} = T_{р. i};$$

2-й уровень оценок
для однопозиционных станков

$$a_i \geq \frac{T_{ц. i} N_r}{F \eta_r}; \quad T_{ф. i} = T_{р. i};$$

для жесткосблокированных линий

$$a_i \geq \frac{N_r T_{ц. i \max}}{F \eta_r \xi_i}; \quad T_{ф. i} = T_{ц. i \max} N_p \xi_i;$$

для гибких систем

$$a_i \geq \frac{N_r T_{ц. i \max}}{F \eta_r i \gamma_i}; \quad T_{ф. i} = T_{ц. i \max} N_p;$$

3-й уровень оценок
для однопозиционных станков

$$a_i \geq \frac{T_{ц. i} (1 + \sum B_i) N_r}{F}; \quad T_{ф. i} = T_{р. i};$$

для жесткосблокированных линий

$$a_i \geq \frac{N_r T_{ц. i \max} (1 + \sum B_{i экв})}{F}; \quad T_{ф. i} = T_{ц. i \max} (1 + B_{i экв} (p)) N_p;$$

для гибких систем

$$a_i \geq \frac{N_r T_{ц \max} (1 + \sum B_{i \text{ экв}})}{F}; \quad T_{\phi} = T_{ц \max} (1 + \sum B_{i \text{ экв}}(p)) N_p.$$

Обозначения: $T_{ц}$ — цикл работы оборудования; $\eta_{гi}$ — коэффициент технического использования i -й позиции; N_r — годовая программа выпуска; F — годовой фонд времени оборудования; T_{pi} — расчетная трудоемкость сборки; $T_{ц \max}$ — цикл работы лимитирующей позиции; N_p — количество ручных позиций в линии; ξ_i — коэффициент, учитывающий влияние рассеивания времени выполнения ручных операций; γ — коэффициент, учитывающий влияние накопителей; $\sum B_{i \text{ экв}}$ — величина эквивалентных потерь времени.

Таблица 4.12. Уровни технического оснащения

Уровень	Описание	Характеристика уровня	Оборудование
I	Ручные процессы сборки	Р Р Р...Р Р	Верстаки, инструментальные ящики, специальные инструменты (сборка на рабочем месте)
II	Частично механизированные процессы сборки	ЧМ ЧМ Р...Р Р	Конвейеры, ручной инструмент, питающийся энергией. Поточные линии (выполнение работ вручную)
III	Механизированные процессы сборки	М М ЧМ...ЧМ ЧМ	Транспортеры, ручной инструмент, питающийся энергией, вспомогательные устройства для манипуляции инструментами и узлами (поточные линии, поточные конвейеры)
IV	Частично автоматизированные процессы сборки	А АЧ АЧ...АЧ М	Транспортные устройства, ручной инструмент с автоматизированными подводными устройствами (поточные линии с заданным тактом)
V	Автоматизированные процессы сборки	А А А...А А	Комплектное автоматическое оборудование (в данном случае функции человека — наблюдательные, в исключительном случае он должен вкладывать детали в сложные узлы). Специальное оборудование — ротационные станки и многопозиционные станки и пр.

Сокращения: Р — ручной, М — механизированный, Ч — частично механизированный или автоматизированный, А — автоматический.

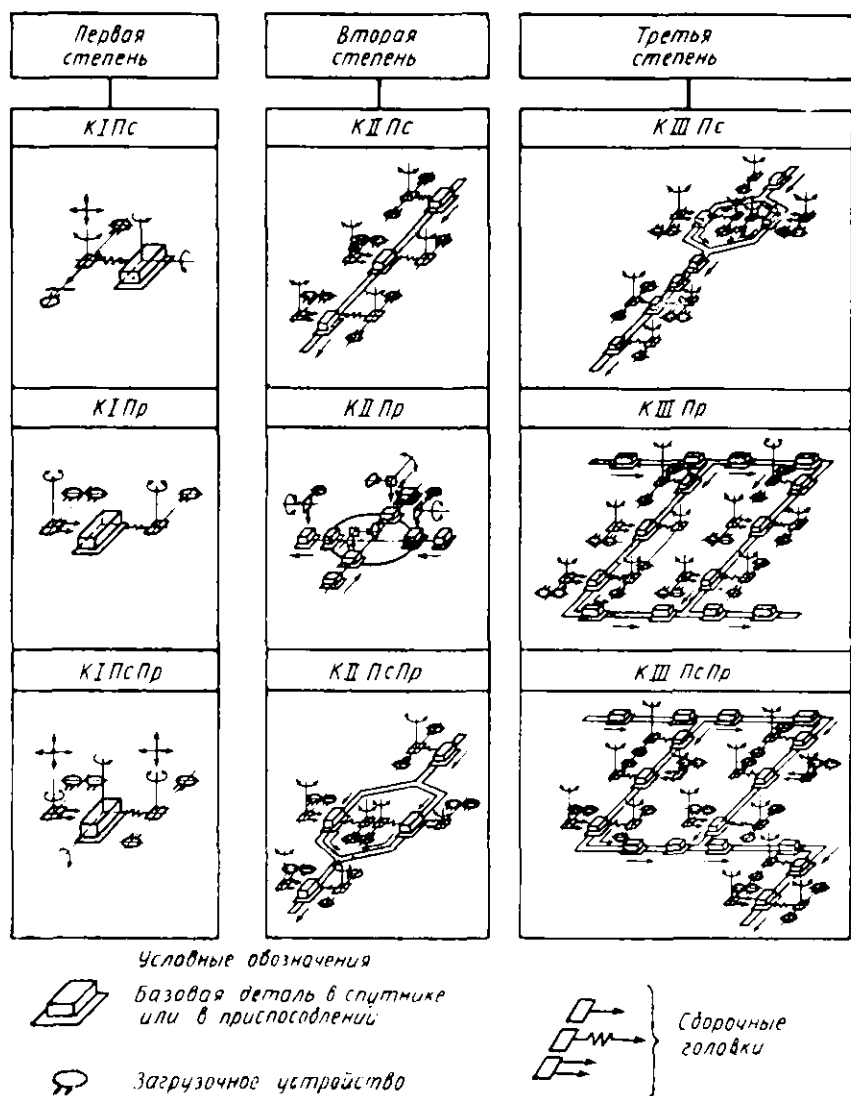


Рис. 4.25. Классификация схем сборочного оборудования по степени концентрации операций

Генерирование вариантов процесса сборки при направленном поиске оптимального осуществляется на основе классификации процессов по степени автоматизации (табл. 4.12), разработанной в ФРГ, и классификацией структурных схем агрегатного сборочного оборудования (рис. 4.25). Все схемы на рис. 4.25 в соответствии с базовой класси-

Таблица 4.13. Таблица

Поверх- ности	Собираемые детали									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Запрес- совка	Клей- мение						
B	Запрес- совка	Запрес- совка	Запрес- совка	Запрес- совка						
C	Завинчи- вание	Завинчи- вание								
D	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание		
E	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Завинчи- вание	Уста- новка	Запрес- совка
F	Запрес- совка									

фикацией (см. рис. 4.4) подразделены на три класса: KI — оборудование для сборки в одной позиции, KII — многопозиционное оборудование (сборочные машины с поворотными столами или линии) с жесткой связью между позициями, KIII — сборочные системы из многопозиционных автоматов или сборочных линий, гибко связанных между собой.

Каждый класс включает в себя три подкласса в зависимости от последовательной (Пс), параллельной (Пр) или параллельно-последовательной (ПсПр) концентрации операций сборочного процесса. Иерархия построения классификации такова, что каждый последующий класс может включать в себя схему любого из трех предыдущих подклассов.

сборочных переходов

		Допустимые варианты объединения механизмов в параллельно работающие блоки	Ограничения на последовательность сборки
11	12		
		A1 A2 A3 A4	
		B1 B2 B3 B4 B5	
		C1 C2	
		D1 D3 D5 D7 D2 D4 D6 D8	
Клей- мение	Клей- мение	E1 E3 E5 E7 E2 E4 E6 E8 E9 E10 E11 E12	E9 → E10 E11 → E12
		F1	

Кроме этого, как и в основной классификации (см. рис. 4.4), каждая из представленных схем может иметь модификации (как на рис. 4.21). Кроме сборки одного изделия в каждой позиции возможна одновременная сборка нескольких одинаковых изделий, последовательная сборка разных изделий с переналадкой и одновременная сборка разных изделий на позиции.

При таком построении классификация систематизирует по признаку концентрации операций не только существующие, но и возможные, еще не реализованные схемы сборочного оборудования.

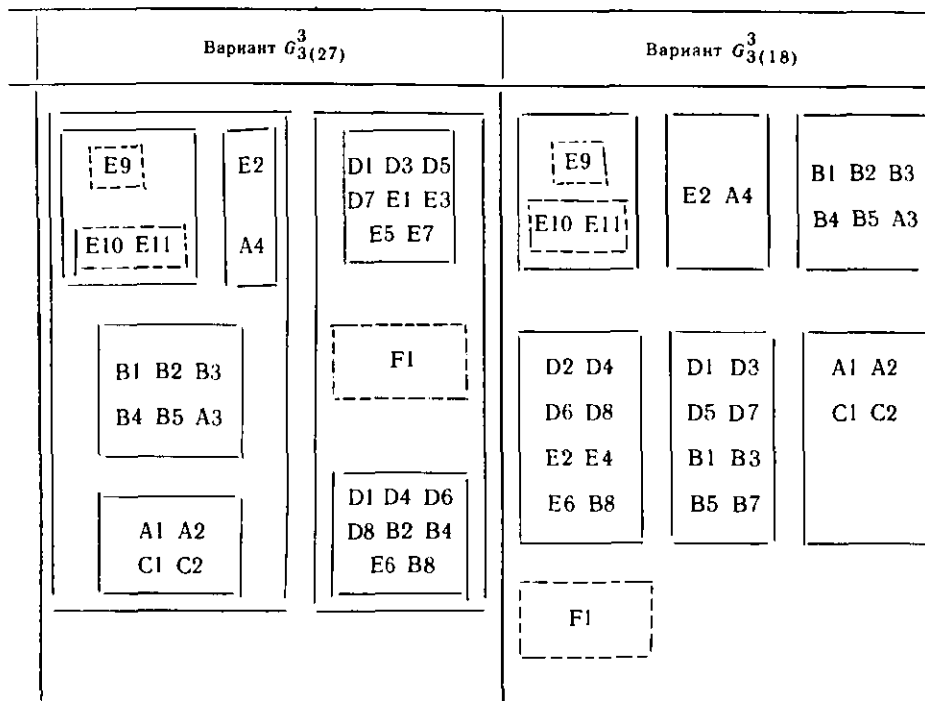
В табл. 4.13, 4.14, а также на рис. 3.4 показан пример генерирования вариантов технологического процесса сборки топливного насоса дизельного двигателя. Элементарные сборочные операции, выполняе-

Т а б л и ц а 4.14. Варианты технологического процесса

Вариант $G_2^3(14)$		Вариант $G_2^3(16)$			
E9A4 E10 E11 E12 B1 B2 E3 E4 A3 F3		E9 E10 E11 E12 A4 B1 B2 B3 B4 B5 A3 A1 A2 C1 C2			
D1 D3 D5 D7 E1 E3 E5 E7 A1 A2 D2 D4 D6 D8 E2 E4 E6 E8 C1 C2		D1 D3 D5 D7 E1 E3 B5 B7 F1 D2 D4 D6 D8 B2 E4 E6 E8			

мые с каждой стороны изделия, обозначены соответствующими кодами, проанализированы схемы базирования изделия при сборке и ограничения на одновременное и последовательное выполнение операций. В левой части табл. 4.13 записана информация о необходимых элементарных операциях для полной сборки изделия, в правой даны варианты объединения сборочных операций. Представление рассматриваемых вариантов в виде схем и пошаговая последовательность оптимизации показаны на рис. 4.26.

Как отмечалось ранее, на 1-м шаге проектируется только один вариант схем (обычно класса КППс) и производится оценка этого варианта применительно к четырем уровням автоматизации (см. табл. 4.12) для определения наиболее целесообразного. Проработка вариантов ведется настолько укрупненно, насколько это необходимо (см. рис. 3.4, 1-й шаг) для подсчета критерия Z^1 . На 2-м шаге анализируется целесообразность использования оборудования, построенного по схемам К1 и К11 с выбранным уровнем автоматизации. Варианты прорабатываются подробнее, а число параметров возрастает. В результате найден перспективный класс схем: сборка на полуавтоматической линии с жестко связанными, последовательно работающими позици-



ми (КП Пс). Сравнение на 3-м шаге подробно проработанных двух вариантов исполнения линии с синхронным и несинхронным транспортом и выбор последнего требует подтверждения (см. рис. 3.4), так как

$$Z^{III} = 42\,400 \text{ руб.} > Z^I = 40\,100 \text{ руб.}$$

Дальнейшие расчеты (рис. 4.27, б) показывают, что найденный вариант G_3^3 наиболее эффективен для заданной годовой программы выпуска ($N_r = 300\,000$ шт.).

Таким образом, из 24 возможных вариантов проанализировано только пять, причем детально проработаны только два варианта. Затраты времени на выбор и обоснование оптимального решения при использовании направленного поиска в десятки раз меньше, чем при полном их переборе.

Интересно исследовать влияние изменения основных параметров и сборочного оборудования на область существования оптимальных решений. Подсчитано (рис. 4.28, а, б), что для рассматриваемого примера выбор схемы определяется программой выпуска. Так, при программах менее 50 тыс. изделий в год наиболее эффективна ручная сбор-

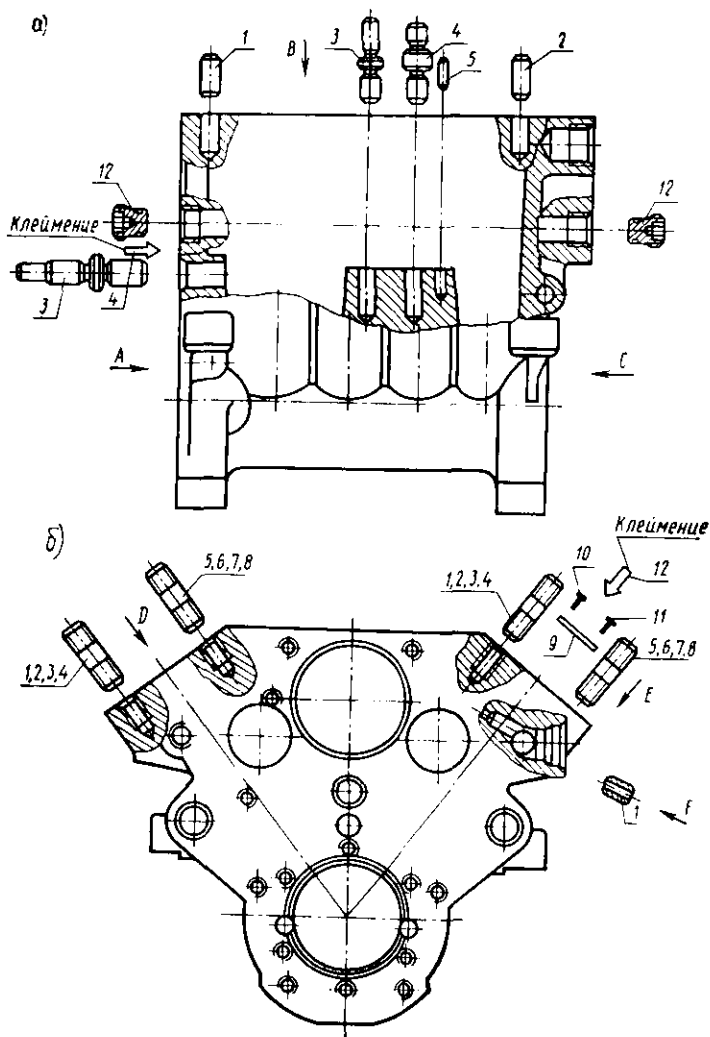


Рис. 4.26. Схема сборки топливного насоса дизельного двигателя

ка на конвейере, от 50 до 100 тыс. — вариант с применением средств механизации, от 100 тыс. и более — полуавтоматическое оборудование либо автоматическая линия. Существенно на окончательный выбор влияет надежность сборочных машин.

Опыт внедрения метода оптимизационного синтеза позволил оценить не только его достоинства, но и недостатки. В ряде случаев недостаточно проводить оценку по одному критерию. Кроме годовых

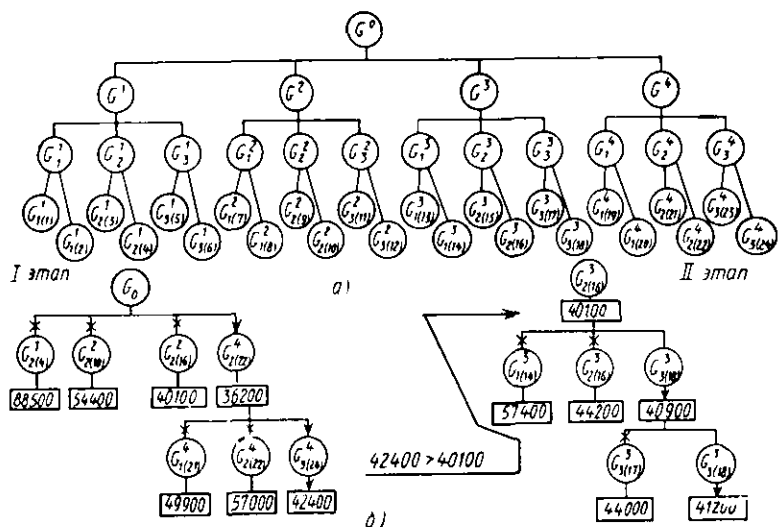


Рис. 4.27. Дерево возможных вариантов сборки топливного насоса и пример выбора оптимального варианта:

а -- возможные варианты; б -- направленный поиск оптимального варианта

затрат Z_j иногда требуется учитывать ряд других критериев, например минимальную трудоемкость изделия (минимальное число рабочих для обеспечения годовой программы выпуска), минимальную металлоемкость ТСМ, производственную площадь, занимаемую оборудованием, максимальный запас варианта по производительности, по точности изготовления изделий и т.д. В этих условиях необходимо генерирование вариантов и выбор такого, который наилучшим образом удовлетворял бы большинству перечисленных критериев, т. е. необходим многокритериальный подход к задаче оптимизации.

Строго математического решения указанная задача не имеет, однако с использованием знаний специалиста задача может быть приближенно решена. В одной из ранее изданных работ* нами даны результаты многокритериальной оптимизации применительно к синтезу схемы сборочной линии для топливного насоса, выбор оптимальной структурно-компоновочной схемы которой обсуждался выше. Трудности решения многокритериальных задач оптимизации определяются тем, что для многих пар альтернатив (вариантов систем) нельзя установить отношений предпочтения. Обычная ситуация такова, что один вариант оказывается лучше другого по одной группе критериев и хуже по другой. Для установления отношений предпочтения строится некоторая функция (типа функции полезности) и с помощью ее упоря-

* См.: Дашенко А. И., Межов А. И. Оптимизационный синтез автоматических систем машин на основе использования теории нечетких множеств // Машиноведение. 1983. № 5, С. 45—48.

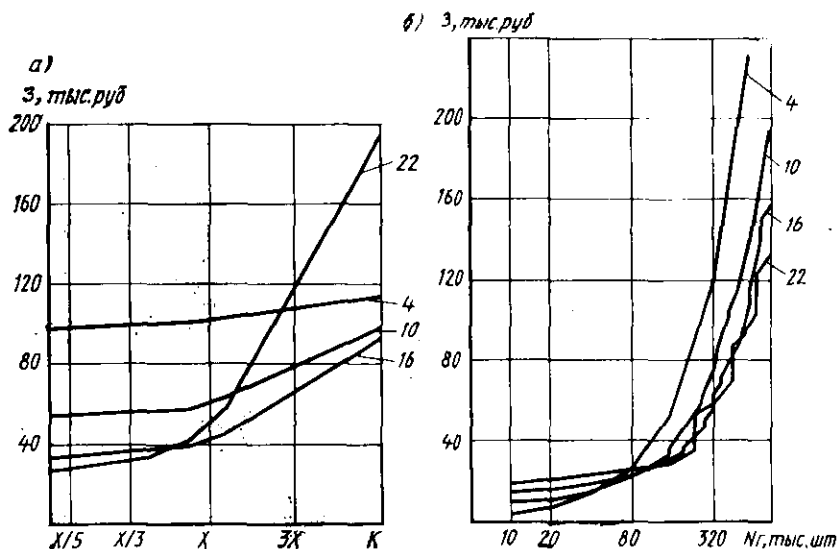


Рис. 4.28. Результаты анализа области рационального использования сборочной несинхронной линии для топливного насоса:

а — зависимость приведенных затрат от изменения капитальных вложений; б — зависимость приведенных затрат от программы выпуска собираемого изделия; вариант 4 — сборка на конвейере с применением ручного механизированного инструмента; вариант 10 — сборка на механизированной линии; вариант 16 — сборка на полуавтоматической линии; вариант 22 — сборка на автоматической линии; К — капитальные вложения по данному варианту в тыс. руб. на программу 300 тыс. насосов в год

дочивается множество альтернатив. При таком подходе всегда существует субъективный фактор, так как не имеется строго определенного (применимого во всех случаях) правила упорядочения. Выбор этого правила зависит от существа рассматриваемой задачи и лица, принимающего решение.

Один из новых подходов к решению многокритериальной задачи оптимизации основан на использовании теории нечетких множеств. Этот подход позволяет к тому же дальше продвинуться на пути формализации задачи. Применим его для решения задачи оптимизации синтеза станочных систем механосборочного производства.

Пусть $Q_1, Q_2, \dots, Q_k$ — скалярные критерии, по которым оцениваются варианты станочных систем, а $Q = \langle Q_1, Q_2, \dots, Q_k \rangle$ — векторный критерий качества. Пусть $X = \{1, 2, \dots, m\}$ — конечное множество альтернатив (вариантов компоновочных схем сборочных машин и линий), $\tilde{A}_i \subset X$, $i = 1, 2, \dots, k$ — нечеткие множества, соответствующие скалярным критериям Q_i и выделяющие варианты станочных систем, которые предпочтительнее других по каждому из скалярных критериев. При этом не решается безоговорочно: включается или нет j -й вариант в множестве $\tilde{A}_i$, а лишь определяется степень принадлеж-

ности этого варианта множеству A_i . Таким образом, нечеткое подмножество $\tilde{A}_i$ задается функцией принадлежности $\mu_i(j)$, принимающей значения из интервала $[0; 1]$. Функция μ_i принимает значение 1, если данный вариант является наилучшим по i -му скалярному критерию, значение 0 для вариантов, не включенных в множество $\tilde{A}_i$ (т. е. для вариантов, которые неприемлемы при их оценке с помощью критерия Q_i). Далее, если вариант j предпочтительнее варианта l по критерию Q_i , то должно выполняться неравенство $\mu_i(j) > \mu_i(l)$, а в случае $j \sim l$ — равенство $\mu_i(j) = \mu_i(l)$. С учетом сказанного функцию принадлежности можно определить следующим образом: для минимизируемого критерия

$$\mu_i(j) = \begin{cases} 1 - \frac{Q_{ij} - Q_{i \min}}{Q_{i \max} - Q_{i \min}}, & \text{если } Q_{ij} - Q_{i \min} \leq \Delta Q_i; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4.26)$$

для максимизируемого критерия.

$$\mu_i(j) = \begin{cases} 1 - \frac{Q_{i \max} - Q_{ij}}{Q_{i \max} - Q_{i \min}}, & \text{если } Q_{i \max} - Q_{ij} \leq \Delta Q_i; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4.27)$$

В формулах (4.26) и (4.27) обозначено: Q_{ij} — значение i -го скалярного критерия для j -го варианта станочной системы; $Q_{i \max}$, $Q_{i \min}$ — максимальное и минимальное значения i -го критерия; ΔQ_i — допустимая уступка по i -му критерию. Заметим, что соотношения (4.26), (4.27) являются лишь одним из возможных способов задания функции принадлежности.

Определим теперь нечетко множество $\tilde{A}$, соответствующее векторному критерию $\tilde{Q}$, как пересечение нечетких подмножеств $\tilde{A}_i$:

$$\tilde{A} = \bigcap_{i=1}^k \tilde{A}_i, \quad (4.28)$$

а функцию принадлежности $\mu_A(j)$ зададим в соответствии с формулой*

$$\mu_A(j) = \min \{\mu_1(j), \mu_2(j), \dots, \mu_k(j)\}. \quad (4.29)$$

Эта функция определяет отношения предпочтения вариантов множества X по векторному критерию $\tilde{Q}$ (большему значению соответствует лучший вариант), а максимум соответствует оптимальному варианту

$$j_{\text{opt}} : \mu_A(j_{\text{opt}}) = \max_{1 \leq j \leq m} \mu_A(j),$$

или с учетом (4.29)

$$j_{\text{opt}} : \mu_A(j_{\text{opt}}) = \max_{1 \leq j \leq m} \min \{\mu_1(j), \mu_2(j), \dots, \mu_k(j)\}.$$

* См.: Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М., 1976. — 196 с.

Заметим, что $\mu_A(j_{opt}) = 1$ лишь в случае, когда $\mu_i(j_{opt}) = 1$, $i = 1, 2, \dots, k$, т. е. когда вариант j_{opt} является наилучшим по всем скалярным критериям. В общем случае $\mu_A(j_{opt}) \leq 1$, что соответствует приближенному характеру решения многокритериальной задачи.

Изложенный метод решения многокритериальной задачи оптимизации по существу обобщает известные методы. Так, (4.29) можно рассматривать как нелинейное соотношение, определяющее безразмерный глобальный критерий качества; соответствующий подбор допустимых уступок в формулах (4.25) и (4.26) позволяет свести к изложенной схеме и метод последовательных уступок с определенной ранжировкой скалярных критериев. Для сокращения числа рассматриваемых вариантов в качестве введенного выше множества X можно рассматривать множество Парето.

Отметим, что субъективный фактор, присущий любым подходам к решению многокритериальной задачи оптимизации, заложен и здесь при задании множества $\bar{A}$ и функции принадлежности $\mu_A(j)$ в виде (4.28) и (4.29).

Применим предложенный выше метод для решения задачи оптимизационного синтеза агрегатной сборочной системы машин, предназначенной для сборки топливного насоса КамАЗ. Варианты таких систем отличаются методами и последовательностью выполнения операций, степенью дифференциации и концентрации операций технологического процесса, типами и конструкторской применяемых механизмов, видами межагрегатной связи, структурно-компоновочными схемами.

Построение агрегатных сборочных машин по различным схемам, объединение различного количества элементарных операций в каждой из них, изменение уровня автоматизации приводят к резкому изменению трудоемкости сборки изделия, к изменению надежности и стоимости сборочных автоматов, занимаемой ими производственной площади, количества рабочих-сборщиков, себестоимости сборки и других характеристик процесса. В итоге степень концентрации операций, выбранные схемы сборочного оборудования и уровень автоматизации оказывают решающее влияние на экономическую эффективность сборочных процессов.

В подтверждение этому на рис. 4.1 показана одна из характерных зависимостей затрат в рублях на сборку годовой программы выпуска изделий (топливного насоса КамАЗ) от уровня автоматизации операций (кривая 1) и степени их концентрации (кривые 2, 3, 4, 5). На этом рисунке варианты станочных систем располагаются в порядке возрастания степени автоматизации (Р — ручная конвейерная сборка, М — сборка с применением средств механизации, П — полуавтоматизированная, А — автоматическая сборка). Внутри этих групп варианты различаются между собой видами концентрации операций (последовательная, параллельная, параллельно-последовательная).

Выше методом направленного поиска выбран оптимальный вариант, отличающийся наилучшими экономическими показателями (минимум приведенных затрат на сборку 300 тыс. насосов в год). Таким

вариантом для заданной годовой программы выпуска оказалась не-синхронная линия (вариант 18).

С целью возможного уточнения оптимального варианта рассмотрим задачу оптимизационного синтеза как многокритериальную (табл. 4.15), а в качестве критериев рассмотрим: Q_1 — приведенные годовые затраты, тыс. руб.; Q_2 — трудоемкость сборки, мин/шт.; Q_3 — металлоемкость применяемого оборудования, кг; Q_4 — запас системы по производительности. Критерии Q_1, Q_2, Q_3 минимизируются, Q_4 максимизируется. Значения критериев приведены в табл. 4.15.

Таблица 4.15. Критерии оптимизации

№ варианта	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	№ варианта	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
1	123,3	7,13	450	1,02	13	74,2	3,58	4340	1,08
2	102,6	5,93	400	1,09	14	57,4	2,70	3760	1,04
3	103,1	5,86	960	1,11	15	49,1	2,01	4920	1,07
4	101,7	5,78	960	1,12	16	44,2	1,83	4320	1,06
5	97,7	5,53	1040	1,03	17	44,0	1,75	4520	1,23
6	91,1	5,03	1680	1,13	18	40,6	1,59	4660	1,28
7	102,9	5,53	2770	1,00	19	66,4	2,79	6230	1,00
8	72,0	3,77	2510	1,19	20	49,9	1,89	5870	1,13
9	63,9	3,21	3000	1,00	21	41,8	1,12	7540	1,15
10	61,8	3,09	2990	1,11	22	57,0	1,20	12280	1,85
11	60,2	2,96	3200	1,05	23	44,6	1,04	8940	1,00
12	56,8	2,69	3590	1,05	24	42,4	1,04	8220	1,00

Таблица 4.16. Оценки вариантов

j	Q_{1j}	$\mu_1(j)$	Q_{2j}	$\mu_2(j)$	Q_{3j}	$\mu_3(j)$	Q_{4j}	$\mu_4(j)$	$\mu_A(j)$
18	40,6	1,00	1,59	0,89	4660	0,46	1,28	1,00	0,46
21	41,8	0,98	1,12	0,99	7540	0,09	1,15	0,43	0,09
24	42,4	0,97	1,04	0,00	8220	0,00	1,00	0,00	0,00
17	44,0	0,95	1,75	0,86	4520	0,47	1,23	0,82	0,47
16	44,2	0,94	1,83	0,84	4320	0,50	1,06	0,21	0,21
12	56,8	0,74	2,69	0,67	3590	0,59	1,05	0,18	0,18
11	60,2	0,68	2,96	0,61	3200	0,64	1,05	0,18	0,18
10	61,8	0,66	3,09	0,58	2990	0,67	1,11	0,39	0,39
8	72,0	0,49	3,77	0,44	2510	0,73	1,19	0,68	0,44
6	91,1	0,185	5,03	0,18	1680	0,84	1,13	0,46	0,18
5	97,7	0,08	5,53	0,08	1040	0,92	1,03	0,11	0,08
4	101,7	0,02	5,78	0,05	960	0,92	1,12	0,43	0,02
2	102,6	0,00	5,93	1,00	400	1,00	1,09	0,321	0,00

В результате сравнения вариантов выяснено, что по всем четырем критериям выполняются следующие отношения предпочтения (в скобках приведены менее желательные значения): 18 (15, 19, 20); 4 (3);

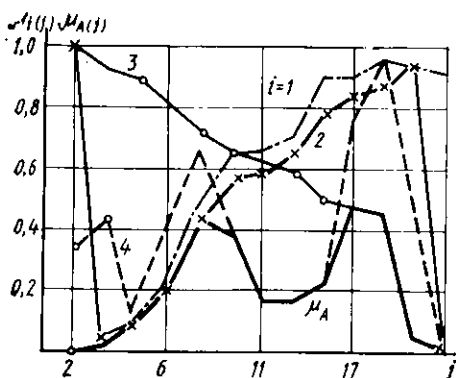


Рис. 4.29. Многокритериальный анализ вариантов компоновок сборочной линии

24 (23); 21 (22); 2 (1); 6 (7); 12 (14); 10 (9, 13). Поэтому варианты 1, 3, 7, 9, 13, 14, 15, 19, 20, 22, 23 можно исключить из рассмотрения и положить $X = \{2, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 21, 24\}$. В табл. 4.16 приведены значения критериев оптимизации для вариантов множества X , расположенных в порядке возрастания критерия Q_1 .

Функции принадлежности $\mu_{1,2,3}(j)$ вычислены по формуле (4.26), а $\mu_4(j)$ — по формуле (4.27) (при $\Delta Q_j = \infty$). В последнем столбце таблицы приведены значения функции принадлежности $\mu_A(j)$, соответствующей четырем критериям и определяемой по формуле (4.29). Оптимальным вариантом решения четырехкритериальной задачи синтеза сборочной системы является вариант 17, которому соответствует максимум функции μ_A .

Близкими к этому варианту по значениям функции μ_A являются варианты 18, 10, 8. Учитывая, что по наиболее важному критерию (приведенным затратам) из этих вариантов лучшим является вариант 18, его и принимаем в качестве решения четырехкритериальной задачи. На рис. 4.29 построены графики функций принадлежности для рассматриваемого примера.

Очень важной задачей автоматизации сборки является проектирование оптимальных технологических процессов для группы изделий, собираемых на переналаживаемом оборудовании, и выбор схем сборочных машин и линий. Необходимо отметить, что время выполнения сборочных переходов, как правило, намного меньше, чем время обработки деталей, из которых собрано изделие. При коротких циклах сборки (несколько секунд, иногда несколько десятков секунд) для мелких и средних по размерам изделий наиболее эффективна автоматизация сборки, когда за каждой единицей сборочного оборудования закреплено несколько изделий, т. е. в условиях групповой сборки на переналаживаемых автоматах или линиях.

Методический подход к проектированию группового сборочного процесса во многом аналогичен описанному выше методу проектирования групповых процессов обработки деталей резанием. Первоначально из множества собираемых изделий выделяются группы, которые закрепляются за переналаживаемыми линиями. По изделию представителю с суммарной программой выпуска генерируются варианты технологического процесса и соответствующих структурно-компоновочных схем сборочных машин и линий.

Как и ранее, генерируются не все технически возможные варианты, а только те, которые необходимо анализировать в процессе направленного поиска оптимального варианта.

При разработке вариантов с разной степенью их детализации используется классификация структурных схем перенастраиваемого сборочного оборудования (рис. 4.30). Формулы для оценки рассматриваемых вариантов на каждом шаге поиска приведены ниже, а укрупненная блок-схема решения задачи в режиме диалога с компьютером — на рис. 4.31.

Расчетные формулы.

1-й шаг

$$Z^I = \sum_{j=0}^n Z_j = \sum_{j=1}^n \left[N_j (\delta + \beta) S_{оп} T_{\Phi j} + (E_n + \alpha) \frac{F_j}{F_n} \sum_{i=1}^M A_i a_i \right]$$

$$\text{где } T_{\Phi j} = \sum_{i=1}^M T_{ij} \text{ (т. е. } j=1); \quad F_j = \frac{N_j T_{\Phi j}}{\sum_{j=1}^n N_j T_{\Phi j}} F_n;$$

$$a_i = \max_{j=1, 2, \dots, n} a_{ij}; \quad a_{ij} = \left[\frac{N_j T_{ij}}{F_j} \right] + 1;$$

2-й шаг

$$Z^{II} = \sum_{j=1}^n Z_j = \sum_{j=1}^n \left[N_j (\delta + \beta) (S_{оп} T_{\Phi j} + S_n T_{неп}^{\min}) + \right. \\ \left. + (E_n + \alpha) \frac{F_j}{F_n} \sum A_i a_i \right].$$

$$\text{где } T_{\Phi j} = \frac{\sum_{i=1}^M T_{ij} (1 + B_{ij})}{f_j}; \quad F_j = \frac{N_j \sum_{i=1}^M T_{ij} (1 + B_{ij})}{\sum_{j=1}^n N_j \sum_{i=1}^M T_{ij} (1 + B_{ij})};$$

$$B_{ij} = B_{об} + B_{ок.н}; \quad a_i = \max_{j=1, 2, \dots, n} a_{ij};$$

$$a_{ij} = \left[\frac{N_j T_{ij} (1 + B_{ij})}{F_j} \right] + 1; \quad T_{неп}^{\min} = k \sum t_{неп}^{\min} / N_j;$$

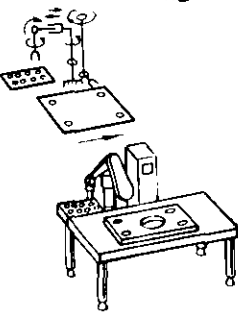
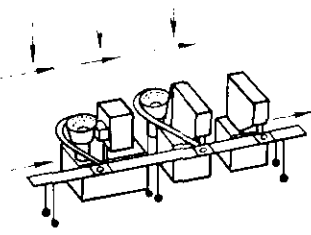
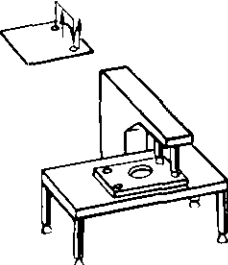
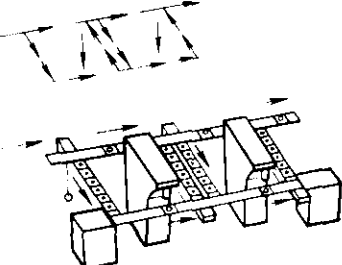
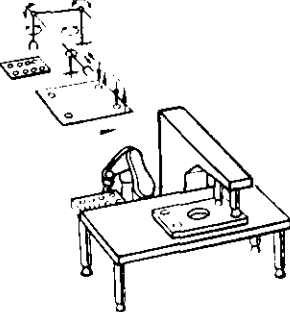
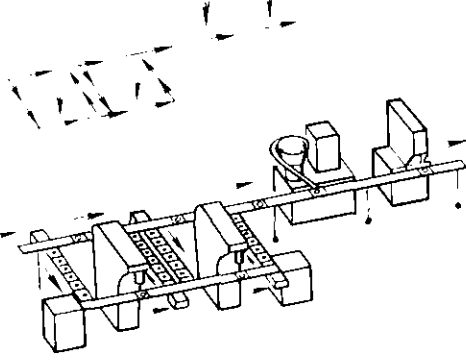
Последовательная	KI 	KII 
Параллельная		
Параллельно - последовательная		

Рис. 4.30. Классификация гибкого (перенастраиваемого) сборочного оборудования

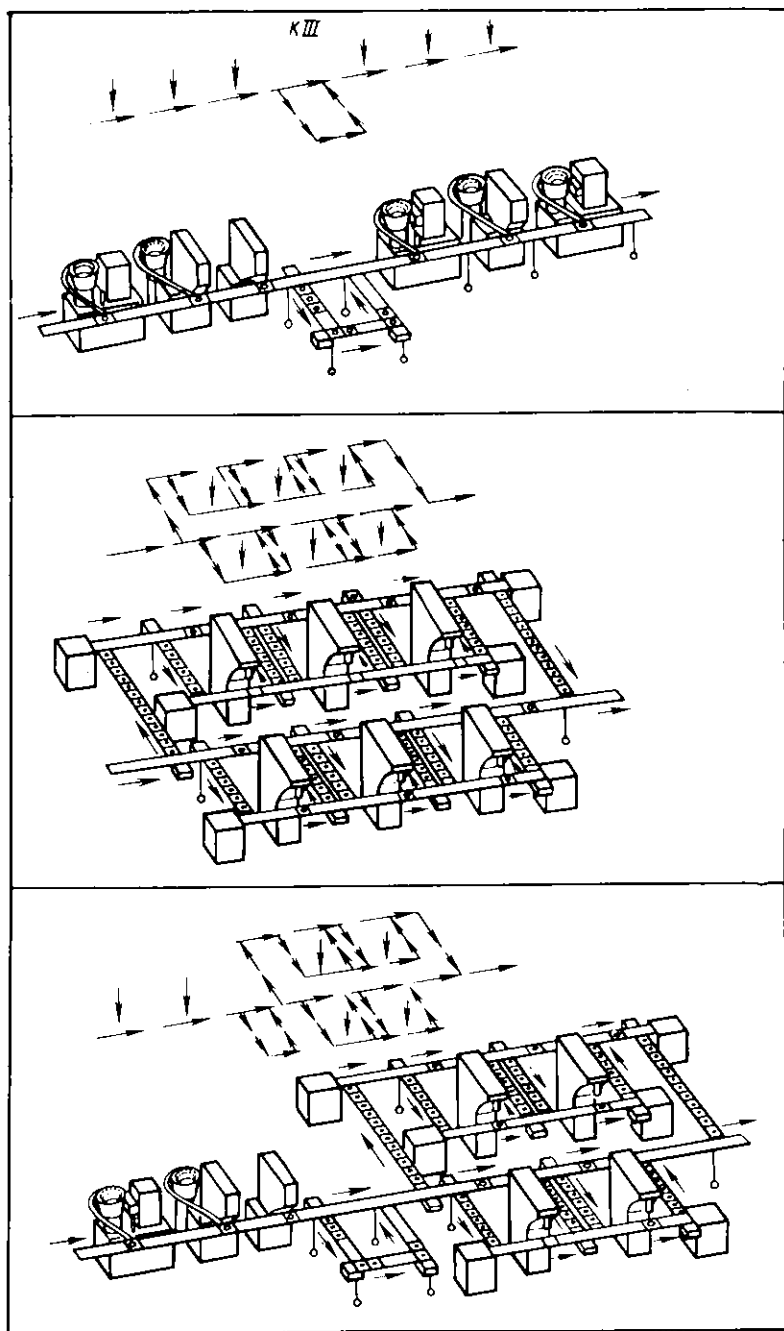


Рис. 4.30. (продолжение)

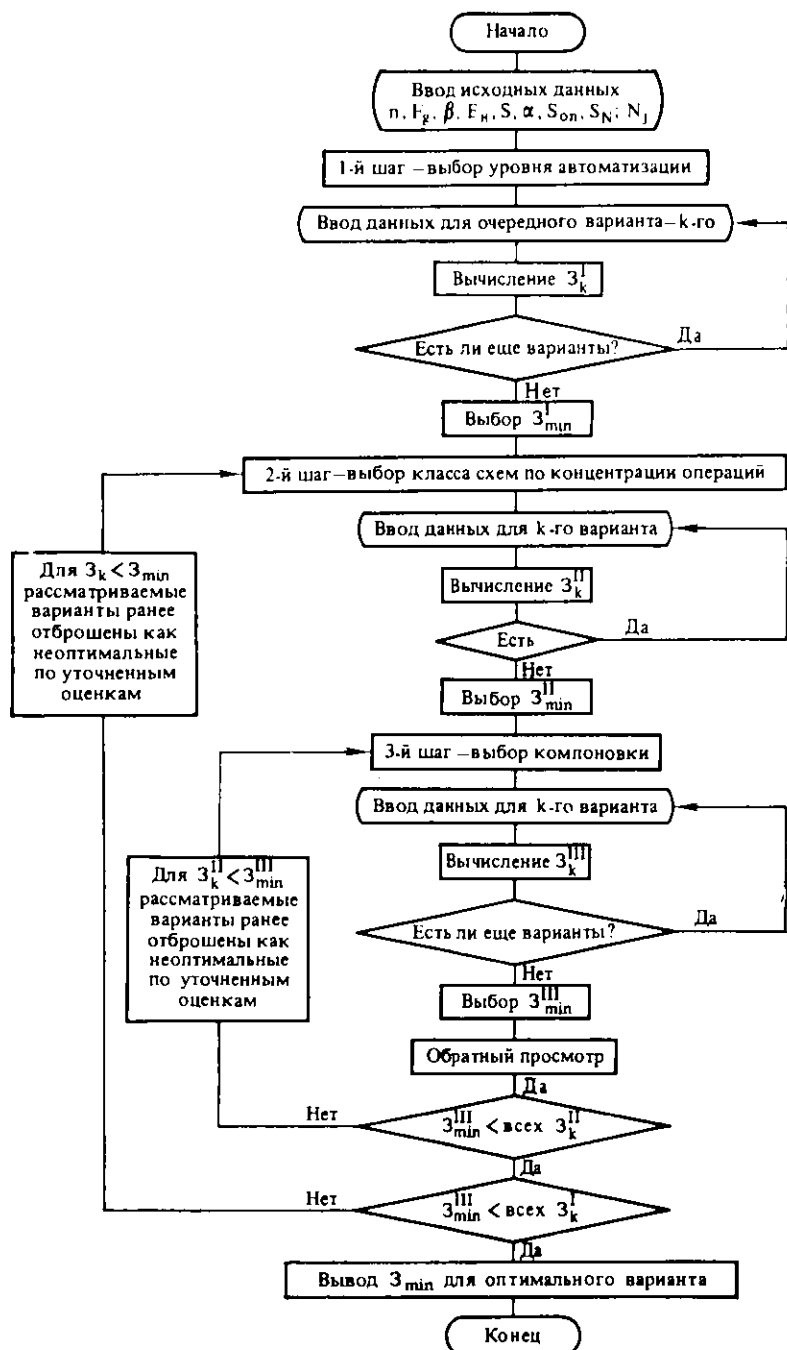


Рис. 4.31. Укрупненная блок-схема направленного поиска оптимальной компоновки ПАЛ сборки

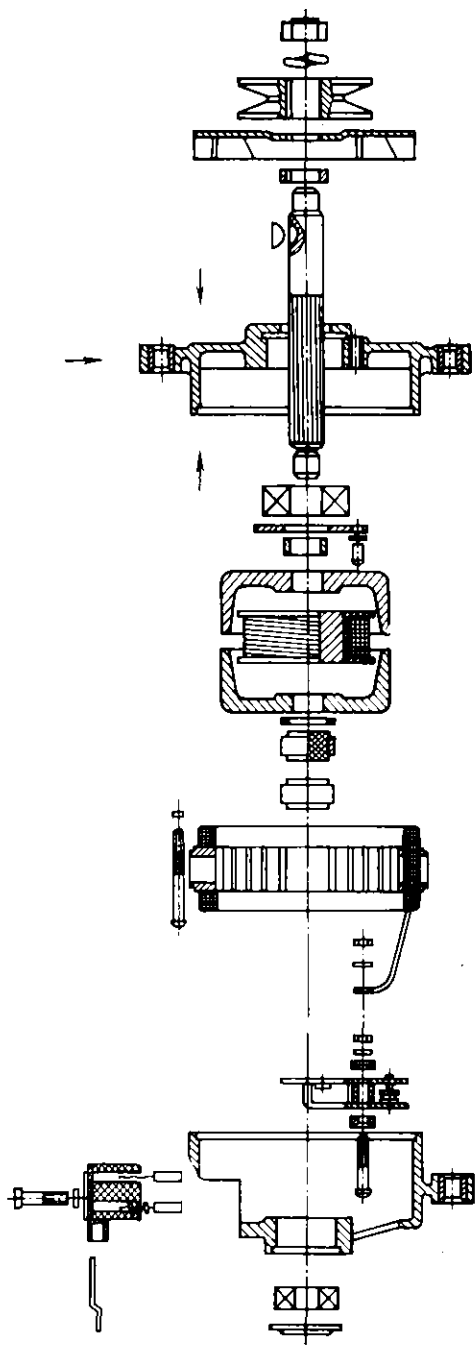


Рис. 4.32. Эскиз генератора

Таблица 4.17. Типы генераторов, их массы

Тип генератора	28.3701	Г502А	Г424	Г221	Г221А-006 Г22 37.3701
Масса, кг	2,1	3,2	3,7	4,4	4,7—4,9
Количество типов генераторов	1	1	1	1	3
Объект применения	Мотоцикл ЗАЗ, ИЖП4	—	Мотоцикл М67-36	ВАЗ-21013, ВАЗ-2102, ВАЗ-21011	ВАЗ-2121, ВАЗ-2105, ВАЗ-2107, ВАЗ-2108
Годовая программа выпуска, тыс. шт.	460	230	104	270	250

3-й шаг

$$Z^{III} = \sum_{j=1}^n Z_j = \sum_{j=1}^n \left\{ N_j (\delta + \beta_j) \left[S_{оп} T_{\Phi j} + S_N \left(\sum_{i=1}^M T_{ij} B_{ij} + T_{пер} \right) \right] + (E_n + \alpha) \frac{F_j}{F_d} \sum_{i=1}^M A_i a_i \right\},$$

$$\text{где } T_{\Phi j} = \frac{\sum_{i=1}^M T_{ij} (1 + B_{ij})}{f_j}; \quad B_{ij} = (B_{об} + B_{ож.н}) \gamma;$$

$$a_i = \max_{j=1,2,\dots,n} a_{ij}; \quad a_{ij} = \left[\frac{N_j T_{ij} (1 + B_{ij})}{F_j - T_{пер} N_j} \right] + 1;$$

$$T_{пер} = k \Sigma t_{пер} / N_j; \quad F_j = \frac{N_j \sum_{i=1}^M T_{ij} (1 + B_{ij})}{\sum_{i=1}^n N_j \sum_{i=1}^M T_{ij} (1 + B_{ij})}.$$

Обозначения: $T_{пер}$ ($T_{пер}^{мин}$) — суммарное время на переналадку оборудования, отнесенное к одному изделию соответственно оптимальное и минимальное, мин; $\Sigma t_{пер}$ ($\Sigma t_{пер}^{мин}$) — суммарное время на переналад-

Г250В-П, Г254, Г266, Г273, 29.3701, 32.3701	16.3701, 17.3701	Г287-Е, Г288, 381.3701	Г286, Г289	Г230
5,5—6,0	6,0—6,7	10—11	15—16,5	22
18	4	9	3	3
ГАЗ-53, УАЗ-452, 451; ЗИЛ; КаВЗ-685, КамАЗ-5320, Москвич-2140, МАЗ-500	РАФ-2209, ПАЗ-672	ЗИЛ-133, ГАЗ, К700, К701	Автобус ЛАЗ-4202, ЛИАЗ	ГАЗ-41, ГАЗ-49
2000	740	220	80	20

ку оборудования (оптимальное и минимальное), мин; k — число переналадок в год с q -го на j -е изделие; $T_{фj}$ — общая трудоемкость сборки j -го изделия, мин; T_{ij} — время цикла сборки на i -м станке j -го изделия, мин; N_j — годовая программа выпуска j -го изделия, шт.; n — число изделий в группе, шт.; F_d — действительный годовой фонд времени работы оборудования, мин; $S_{оп}$, S_N — минутная заработная плата оператора — сборщика и наладчика, руб.; F_j — часть годового фонда времени, отводимая на сборку j -го изделия, мин; M — число концентрированных операций, необходимых для полной сборки изделия; a_i — число сборочных станков (линий) на i -й операции; A_i — стоимость станка (линии) на i -й операции, руб; f_{ij} — коэффициент многостаночного обслуживания (отношение числа станков к числу операторов); B_{ij} — удельная длительность простоя i -го станка при сборке j -го изделия; $B_{об}$, B_N — удельная длительность устранения отказов сборочного оборудования и ожидания наладчика; δ , β , E_n , α — коэффициенты; i — номер сборочной операции; j — номер собираемого изделия; T_j (T'_j) — такт выпуска j -го изделия гибкой технологической системой (технологической системой для сборки j -го изделия); a_{ij} — количество сборочного оборудования i -го вида (простейшей компоновки) для сборки j -го изделия в течение времени F_j ; Z_j — приведенные затраты на обработку годовой программы сборки j -го изделия в течение времени F_j , руб.

Рассмотрим метод оптимизации на примере групповой сборки генераторов, типовой представитель которых показан на рис. 4.32, а перечень типов изделий с их основными параметрами дан в табл. 4.17.

Общая программа выпуска — $300 \cdot 10^3$ шт/год. В соответствии с обозначением сторон и номеров собираемых деталей, так же как это сде-

лано в табл. 4.13, представим исходную информацию о всех технологических переходах, необходимых для полной сборки изделий для случая, когда в качестве базовой детали принята крышка (рис. 4.32).

Такая же таблица может быть составлена, если сборка начинается с установки детали. Определены ограничения на последовательность и параллельность выполнения переходов исходя из требований качества изготовления генераторов.

На рис. 4.33 показан граф сборки изделия представителя, а на рис. 4.34 — компоновочная схема переналаживаемой линии, обеспе-

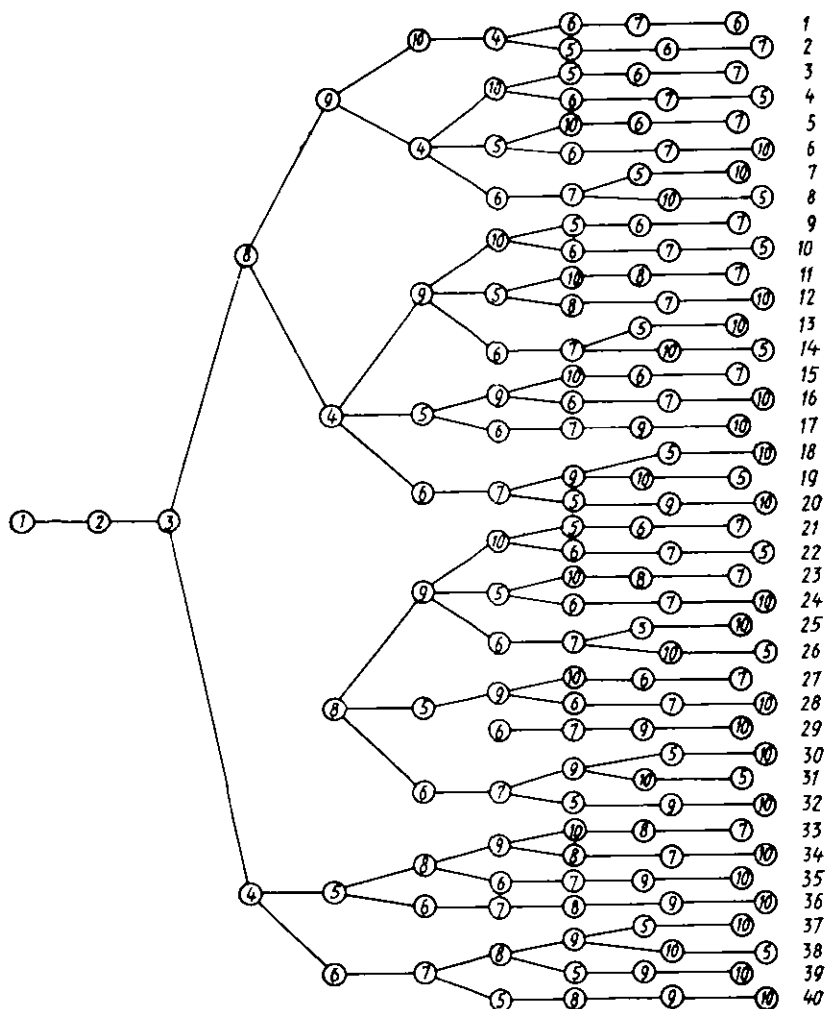


Рис. 4.33. Граф сборки генератора

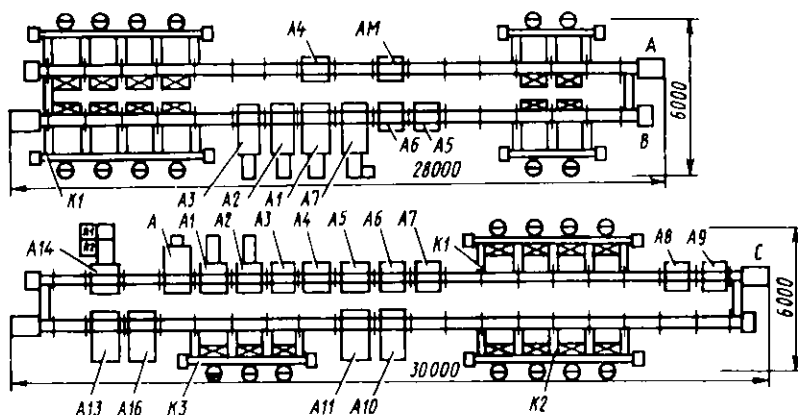


Рис. 4.34. Схема компоновки переналаживаемой линии для сборки генераторов трех типов

чивающей минимальные годовые затраты на сборку выбранной группы изделий. Данная схема является основной для более детальной проработки техпроцесса сборки и компоновки сборочной линии на стадии рабочего проекта или для дальнейшего анализа при многокритериальной оптимизации, в том числе с учетом фактора неопределенности.

Глава 5

МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИН

§ 5.1. ЭТАПЫ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАНОЧНЫХ ЛИНИЙ

Усложнение структур и компоновок TCM, существенное повышение требований к качеству проектных решений и точности выполняемых на этой стадии расчетов приводит к интенсивному развитию методов статистического моделирования автоматических линий (АЛ) и комплексов, новому направлению их анализа. Метод статистического моделирования на ЭВМ функционирования технологического оборудования не только служит хорошим дополнением к аналитическим методам расчета, но и позволяет решать такие задачи, которые сегодня еще не могут быть решены на основе использования аналитических методов.

Под *статистическим моделированием* понимают имитацию работы на ЭВМ, т. е. воспроизведение функционирования АЛ и TCM на основе использования их моделей, построенных на закономерностях, которые получены в результате производственного эксперимента.

Таким образом, моделирование можно рассматривать как средство изучения АЛ путем замены ее более удобной для исследования моделью, сохраняющей все существенные черты оригинала.

В процесс моделирования обычно входят следующие этапы: постановка задачи исследования; построение математической модели АЛ; составление программы для ЭВМ, позволяющей имитировать функционирование АЛ в соответствии с ее моделью; проверка степени соответствия результатов моделирования реальным данным; планирование статистического эксперимента и его выполнение; обработка результатов моделирования и формулировка выводов.

В зависимости от степени детализации модели (сблокированная АЛ в некоторых случаях может рассматриваться как один из простейших элементов ТСМ, в других — как сложная система, включающая ряд простых элементов: унифицированных узлов, режущих инструментов и т. д.) моделирование может быть использовано на всех стадиях проектирования и эксплуатации АЛ, начиная от укрупненного сравнения нескольких вариантов компоновок ТСМ на этапе разработки технического задания на проектирование и кончая детальным анализом различных стратегий обслуживания каждого инструмента, находящегося в эксплуатации.

§ 5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СБЛОКИРОВАННЫХ (СИНХРОННЫХ) ЛИНИЙ

Для построения математической модели функционирования сблочированных (синхронных) линий, а также АЛ, объединенных гибкой связью, необходимо прежде всего установить, насколько правомерно для этих условий использование экспоненциального закона распределения, который получил большое применение при анализе надежности отдельных станков. На основе обследования автоматизированного оборудования, работающего как отдельно, так и в автоматических линиях, были получены экспериментальные законы распределения времени безотказной работы, восстановления (ремонта) АЛ и смены инструментов ($\tau_{\text{раб}}$, $\tau_{\text{рем}}$, $\tau_{\text{см. ин}}$). Эти законы сравнивали с различными теоретическими распределениями, в частности с экспоненциальными. Установлено, что для подавляющего большинства объектов исследования экспериментальные распределения $\tau_{\text{раб}}$ отличаются от экспоненциального.

Аналогичные результаты характерны также для распределения времени на ремонт оборудования $\tau_{\text{рем}}$ и времени на смену и регулирование инструментов $\tau_{\text{см. ин}}$. Анализ большого числа экспериментальных данных показал, что случайное время безотказной работы $\tau_{\text{раб}}$ АЛ, так же как и отдельных ее элементов (например, режущих инструментов), может быть описано законом Вейбулла, а распределение времени простоев $\tau_{\text{пр}}$ — суперпозицией двух экспонент.

На основании обработки экспериментальных данных по обследованию оборудования составлена следующая модель функционирования

сблокированной линии:

$$P(\tau_{\text{раб}} > t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \leq 0; \\ e^{-\left\{\frac{t}{\tau_{\text{раб}}} + \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)\right\}^b}, & \text{если } t > 0; \end{cases}$$

$$P(\tau_{\text{пр}} > t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t = 0; \\ e^{-\mu_{\text{об}} t} + (1 - e) e^{-\mu_{\text{ин}} t}, & \text{если } t > 0, \end{cases}$$

где $\tau_{\text{раб}}$ — наработка на отказ АЛ; Γ — гамма-функция; b — показатель степени, определяющий форму кривой распределения;

$\hat{e} = k_{\text{об}} / (k_{\text{об}} + k_{\text{ин}})$ — доля отказов АЛ из-за отказов оборудования ($k_{\text{об}}$, $k_{\text{ин}}$ — число отказов соответственно оборудования и инструментов за период $T_{\text{ф}}$ функционирования линии);

$\mu_{\text{об}} = 1/\bar{\tau}_{\text{рем}} = k_{\text{об}}/\Sigma \tau_{\text{рем}}$ — интенсивность восстановления отказов оборудования ($\bar{\tau}_{\text{рем}}$ — среднее время ремонта);

$\mu_{\text{ин}} = 1/\bar{\tau}_{\text{см.ин}} = k_{\text{ин}}/\Sigma \tau_{\text{см.ин}}$ — интенсивность восстановления отказов инструментов ($\bar{\tau}_{\text{см.ин}}$ — среднее время смены инструмента).

При этом фактическое время работы АЛ

$$T_{\text{ф}} = \Sigma \tau_{\text{раб}} + \Sigma \tau_{\text{рем}} + \Sigma \tau_{\text{см.ин}}$$

Коэффициент готовности

$$\eta_{\text{г}} = \frac{\Sigma \tau_{\text{раб}}}{T_{\text{ф}}}$$

По данным производственных исследований, $0,6 < b < 1,8$. В частном случае, когда $b = 1$,

$$F(t) = 1 - e^{-t/\tau_{\text{раб}}},$$

т. е. время $\tau_{\text{раб}}$ распределено по экспоненциальному закону.

По стандартной программе на ЭВМ разыгрывается случайное число X , распределенное по закону равной вероятности в интервале $[0,1]$, причем периодичность повторения составляет $2^{18} - 2^{20}$, а затем по формуле

$$\tau_{\text{раб}} = \frac{\bar{\tau}_{\text{раб}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \sqrt[b]{-\ln X}$$

подсчитывается $\tau_{\text{раб}}$, распределенное по закону Вейбулла. Время простоя $\tau_{\text{пр}}$ зависит от вида отказа:

$$R(t) = P\{\tau_{\text{пр}} > t\} = e^{-\mu_{\text{об}} t} + (1 - e) e^{-\mu_{\text{ин}} t}.$$

Для определения причины отказа вновь разыгрывается случайное число X , равномерно распределенное в интервале $[0,1]$, и сравнивает-

ся с числом $\hat{\epsilon}$. Если $X \leq \hat{\epsilon}$, то отказ произошел из-за неисправности механизмов станка и разыгрывается случайное время ремонта станка $\tau_{\text{рем}}$:

$$\tau_{\text{рем}} = \frac{1}{\mu_{\text{об}}} \ln(1 - X).$$

Если $X > \hat{\epsilon}$, то отказ произошел из-за инструментов и определяется случайное время простоя по этой причине:

$$\tau_{\text{см. ин}} = \frac{1}{\mu_{\text{ин}}} \ln(1 - X).$$

В частном случае, когда инструментов нет, $\hat{\epsilon} = 1$ (сборочная линия).

Моделирование работы линий при достаточной точности исходных данных позволяет получить довольно полную и объективную информацию о качестве их функционирования, которая, в свою очередь, является исходной для расчета экономических параметров исследуемой линии, в частности себестоимости изготовления деталей.

Для прогнозирования основных технико-экономических характеристик станочных линий на стадии их проектирования, а также для решения ряда задач, связанных с оптимизацией режимов работы и способов (стратегий) обслуживания инструментов, предложена модель, где сблокированная линия рассмотрена как система, состоящая из m узлов и n инструментов, соединенных последовательно в смысле надежности. При этом периоды безотказной работы и периоды восстановления указанных элементов могут быть распределены по различным законам.

График, иллюстрирующий моделирование на ЭВМ работы синхронной АЛ, показан на рис. 5.1 Здесь каждый функционирующий агрегатный узел (силовые головки, транспортные устройства и т. д.) и каждый инструмент характеризуются распределением времени безотказной работы $\tau_{\text{раб}i}$ и времени восстановления $\tau_{\text{рем}i}$. Для решения ряда задач, связанных с оптимизацией стратегии обслуживания АЛ, время ремонта $\tau_{\text{рем}}$ рассматривается как сумма времен простоя:

$(\tau_{\text{рем}} = \sum_{i=1}^5 \tau_{ri})$. Причина простоев: r_1 — ожидание наладки (или ремонта); r_2 — поиск причины отказа; r_3 — получение запасной части или инструмента (для замены предварительно настроенных на размер инструментов это время на переход наладчика от инструментального шкафа к станку); r_4 — собственно ремонт (смена инструментов); r_5 — проба и настройка отказавшего агрегата после восстановления; $F(t) = P\{\tau_{\text{раб}} \leq t\}$.

Программа моделирования построена таким образом, что составляющие времени τ_{ri} восстановления по каждой из перечисленных причин могли быть заданы разными законами распределения, либо могли быть исключены из рассмотрения ($\tau_{ri} = 0$). В ряде случаев время вос-

становления $\tau_{\text{рем}}$ не дифференцировалось, а суммарная длительность каждого восстановления представлялась распределенной по экспоненциальному закону.

В результате моделирования работы АЛ на печать выводились данные по числу отказов элементов и линии в целом, определялись суммарное время безотказной работы $\Sigma\tau_{\text{раб}}$, а также суммарное время простоев $\Sigma\tau_{\text{рi}}$ по каждой из причин, число обработанных заготовок Q за период моделирования.

Алгоритм (рис. 5.2) моделирования работы АЛ заключается в следующем.

1. Для каждого из n инструментов и m узлов определяют случайное время безотказной работы $\tau_{\text{раб}}$, распределенное по заданному закону.

2. Из всех значений времени безотказной работы $\tau_{\text{раб}}$, полученных на предыдущем шаге, находят минимальное $\tau_{\text{мин}}$.

3. Инструмент или узел, имеющий период безотказной работы $\tau_{\text{мин}}$, заменяют или ремонтируют, при этом увеличивается на единицу число отказов соответствующего узла или инструмента.

4. Увеличивают на $\tau_{\text{мин}}$ суммарное время работы отказавшего узла или инструмента и системы в целом, т. е. подсчитывают суммарное время безотказной работы $\Sigma\tau_{\text{раб}}$ каждого узла или инструмента и системы в целом.

5. Для отказавшего узла или инструмента определяют время замены или ремонта $\tau_{\text{рi}}$, распределенное по заданному закону.

6. Увеличивают на $\tau_{\text{рi}}$ суммарное время восстановления отказавшего узла или инструмента и системы в целом, т. е. подсчитывают суммарное время восстановления $\Sigma\tau_{\text{рi}}$ каждого узла или инструмента и системы в целом.

7. Определяют время доработки до отказа инструментов и узлов:

$$\tau_i = \tau_{\text{раб } i} - \tau_{\text{мин}}$$

причем наименьшее время обозначают $\tau_{\text{мин}}$.

8. Вновь находят случайное время безотказной работы $\tau_{\text{раб}}$ отказавшего инструмента или узла.

9. Перечисленные операции выполняют до тех пор, пока сумма времени полезной работы $\Sigma\tau_{\text{раб}}$, восстановления отказов и инструментов системы $\Sigma\tau_{\text{рi}}$ не достигнет заранее заданного периода времени $T_{\text{мод}}$ — времени моделирования.

В нашем случае время моделирования $T_{\text{мод}} \geq 60\,000$ мин, т. е. если $(\Sigma\tau_{\text{раб}} + \Sigma\tau_{\text{рi}}) \geq 60\,000$ мин, то моделирование прекращается.

Время $T_{\text{мод}}$ определяли исходя из допустимой погрешности результатов моделирования при заданных доверительных интервалах.

Экономическая оценка эффективности работы АЛ производится при различном числе участвующих в работе инструментов, режимах резания, а также стратегиях обслуживания (профилактическая замена инструментов с различными периодами T_i и замена их по отка-

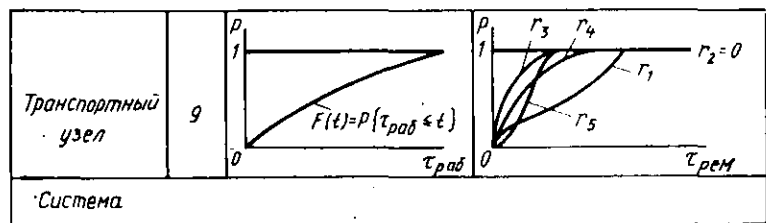
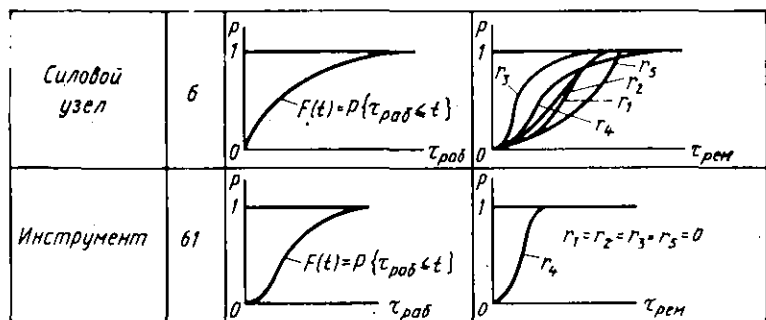
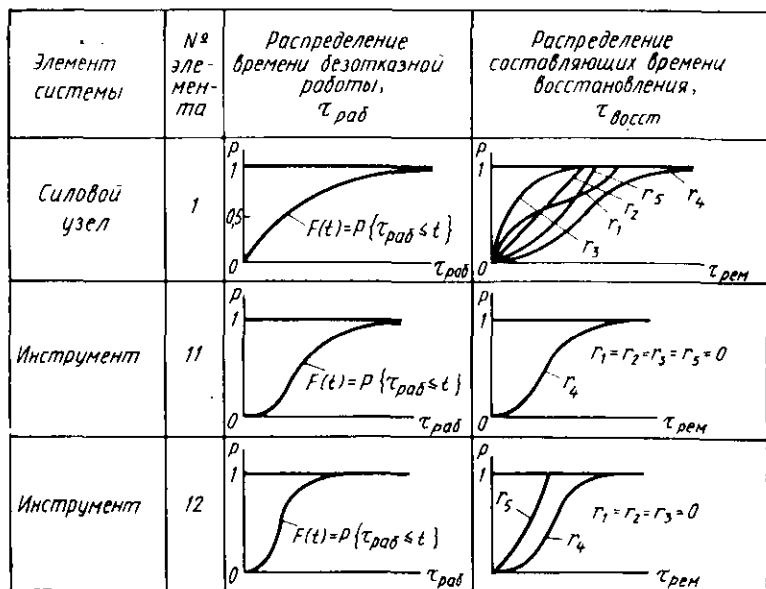
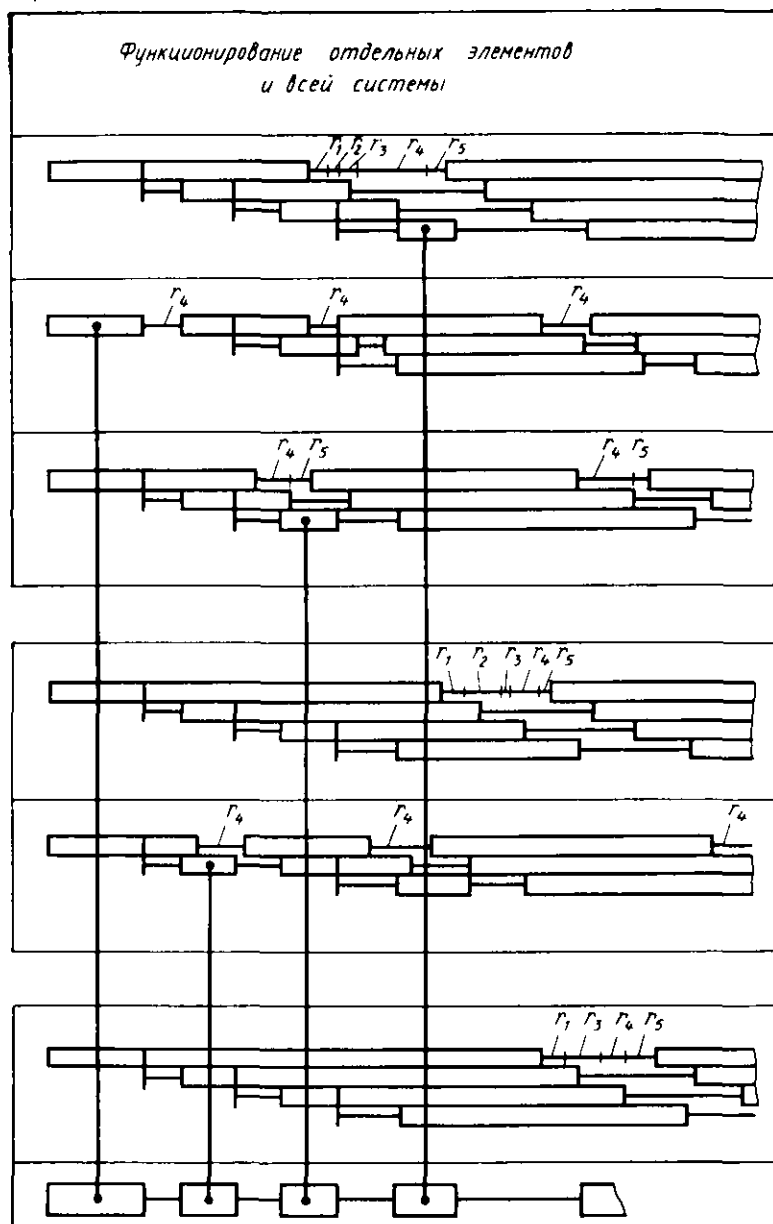


Рис. 5.1. Схема модели функ



ционирования синхронной линии

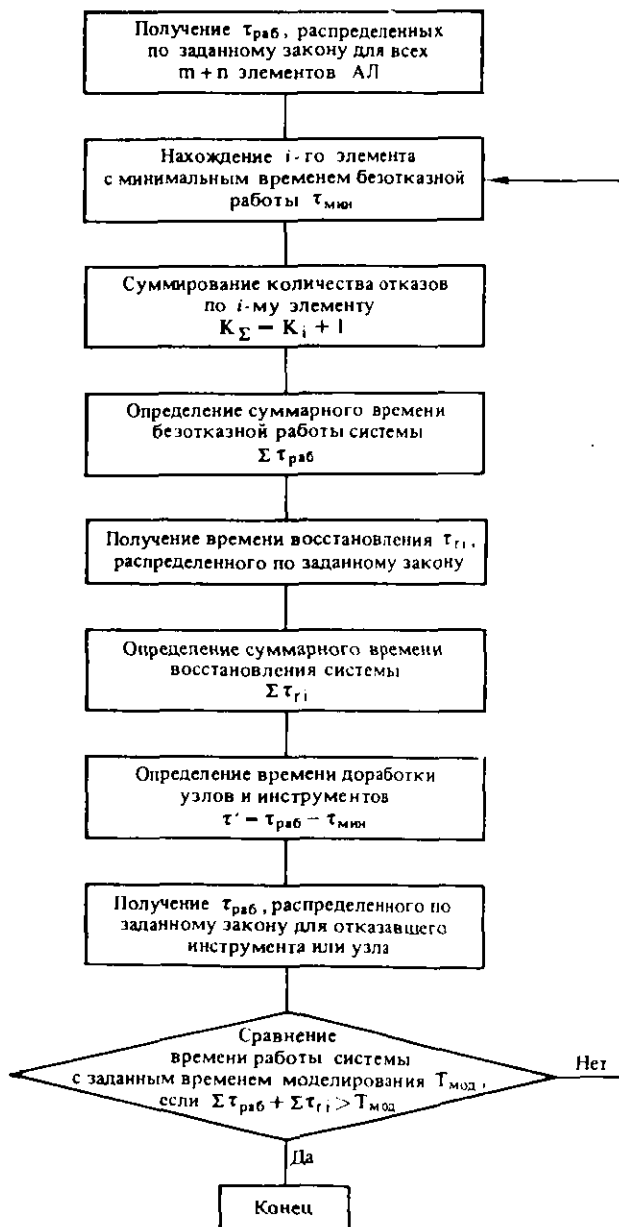


Рис. 5.2. Алгоритм моделирования

зам, мгновенное начало обслуживания после отказа и обслуживание с ожиданием наладчика и др.). Данные моделирования позволяют определить себестоимость детали по фактическим затратам времени на ее обработку с учетом всех статей расхода, определяющих стоимость 1 мин безотказной работы C_{r0} и 1 мин восстановления C_{ri} АЛ по соответствующим причинам:

$$C = \frac{C_{r0} \Sigma \tau_{\text{раб}} + \sum_{i=1}^5 (C_{ri} \Sigma \tau_{ri})}{Q}$$

Моделирование работы синхронной АЛ с экономической оценкой качества ее функционирования позволяет решать следующие задачи:

1) определять законы распределения времени безотказной работы линии и времени восстановления ее работоспособности в зависимости от числа функционирующих элементов и характеристик надежности каждого элемента; установленные таким образом законы распределения для каждой из сблокированных АЛ могут, в частности, вводиться в модель работы АЛ с гибкими связями для имитации процесса ее функционирования на ЭВМ;

2) прогнозировать основные характеристики оборудования на стадии проектирования с целью выбора оптимальных конструктивно-технологических решений, изучать влияние надежности отдельных узлов и инструментов на эффективность работы линии в целом;

3) определять влияние различных законов распределения стойкости инструментов (при одинаковых средних значениях стойкости) на производительность, надежность и устойчивость (ритмичность) работы АЛ, оптимизировать режимы резания оборудования с учетом распределения сроков службы каждого инструмента;

4) выбирать оптимальную стратегию обслуживания инструментов при заданных законах распределения их стойкости, сравнивать эффективность обслуживания инструментов по отказам с эффективностью профилактического обслуживания, эффективность групповой и индивидуальной замены инструментов;

5) исследовать влияние физического «старения» (увеличения интенсивности отказов) подверженных изнашиванию узлов линии на ее производительность, надежность, экономическую эффективность за весь период эксплуатации.

Рассмотрим отдельные задачи.

Повышение производительности и эффективности АЛ путем оптимизации режимов резания и периодов замен инструментов. Производительность и экономическая эффективность АЛ существенно зависят от выбранных режимов резания и способов смены инструментов. Если бы стойкость режущих инструментов была детерминированной величиной, однозначно зависимой от режимов резания, то задача расчета производительности решалась бы достаточно просто. Однако процессы резания являются по своей природе стохастическими, режущие же

свойства инструмента характеризуются соответствующими законами распределения стойкости, которые дают исчерпывающую характеристику реального процесса, поэтому для определения оптимальных режимов резания и производительности в условиях рассеяния стойкости необходима разработка вероятностной модели оптимизации с учетом закона распределения стойкости инструментов и способов (стратегий) их смены.

При моделировании можно анализировать различные способы смены инструментов. Рассмотрим следующие: а) смену инструментов по отказам; каждый отказавший инструмент заменяют по мере его выхода из строя через случайный период времени безотказной работы; б) смешанную смену инструментов; каждый инструмент заменяют принудительно через промежуток времени T_i ; инструмент, вышедший из строя раньше этого периода, заменяют по отказу.

При смешанной смене часть инструментов заменяют до использования ими полного ресурса работоспособности. Среднее время недоиспользования ресурса работоспособности инструмента

$$\bar{\tau}_T = \int_{T_i}^{\infty} [1 - F(x)] dx$$

есть площадь, численно равная времени недоиспользования ресурса работоспособности инструмента.

Ввиду того что среднее время на смену инструмента при принудительной замене меньше среднего времени при смене по отказам (сокращается время на поиск отказавшего инструмента, на ожидание наладчика), а число повторных заточек и общий срок службы инструмента соответственно увеличиваются, экономическая эффективность работы АЛ в целом повышается.

При использовании этого способа необходимо иметь счетчики циклов для каждого инструмента (или группы инструментов), настроенные на период их смены T_i .

Как показали результаты моделирования, при смене по отказам (рис. 5.3) производительность АЛ не зависит от закона распределения стойкости, если среднее значение стойкости $\bar{T}_n = \text{const}$. Оптимальное значение скорости резания по производительности для любого закона распределения стойкости одно и то же (в нашем примере $v_{\text{опт}} = 20,4$ м/мин, кривая 1). Аналогичные результаты получились и во всех других примерах моделирования работы линии с различными m и n . Однако ввиду различной природы отказов при различных законах распределения стойкости стоимость эксплуатации инструментов будет различной. Так, например, для экспоненциального закона [показатель степени в формуле (4.29а) $b = 1$], как правило, характерны поломки инструментов, что приводит к резкому увеличению стоимости эксплуатации инструментов. Стоимость эксплуатации инструментов при распределении их стойкости по закону Рэлея ($b = 2$) и нормальному закону ($b = 3$) существенно ниже, так как число поломок составляет

Рис. 5.3. Зависимость производительности Q и себестоимости C обработки детали для различных законов распределения стойкости при замене инструментов по отказам

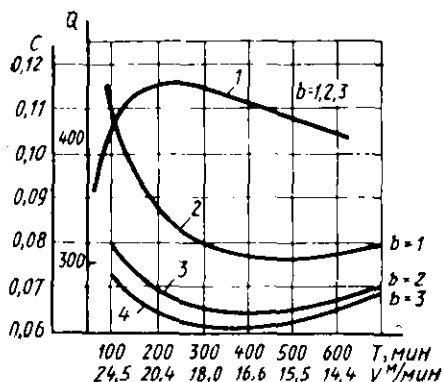
соответственно 15–20 и 5–10 % общего числа работающих инструментов.

Учет этого фактора может существенно повлиять на выбор оптимальных режимов в зависимости от закона распределения стойкости. Так, для экспоненциального закона ($b = 1$) оптимальное значение скорости резания по себестоимости (кривая 2) $v_{опт} = 15,5$ м/мин, для закона Вейбулла с $b = 2$ $v_{опт} = 16,6$ м/мин (кривая 3), для случая с $b = 3$ $v_{опт} = 18,0$ м/мин (кривая 4). Наименьшее значение скорости резания получается при экспоненциальном законе распределения. С увеличением b оптимальная скорость резания смещается в сторону больших значений, при этом растет производительность Q . Это подчеркивает важность создания таких условий обработки (к ним в первую очередь необходимо отнести стабильность качества материала инструментов и обрабатываемых заготовок, стабильность припусков на обработку, качество заточки инструментов, техническое состояние оборудования), которые обеспечивали бы минимальное рассеяние стойкости по закону, близкому к закону нормального распределения.

В случае смешанной смены инструментов получены результаты, показывающие, что закон распределения стойкости существенно влияет не только на экономические показатели работы АЛ, но и на ее производительность. С увеличением поля рассеяния стойкости (при этом возрастает коэффициент вариации $k_v = \sigma/\bar{T}_n$, а показатель b уменьшается) производительность и экономическая эффективность работы линии снижаются. Исследования показали, что если профилактика не уменьшает время на замену инструмента по сравнению с временем при замене по отказам, то производительность и экономическая эффективность обработки при оптимальном режиме значительно снижаются. Параметры оптимальных режимов резания при этом становятся меньше, чем в случае, когда рассеяние стойкости отсутствует.

Рассмотренные результаты исследования взаимосвязи оптимальных режимов резания и стратегий замен инструментов в условиях рассеяния их стойкости показывают, что методом статистического моделирования АЛ как системы из m узлов и n инструментов можно решать ряд практических задач как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации оборудования.

Исследование влияния различных факторов на ритмичность работы АЛ. В производственных условиях отклонение фактической произво-



длительности от ее среднего значения характеризует ритмичность работы оборудования за определенный промежуток времени, например за период рабочей смены $T_{см}$. Следует заметить, что в литературе по надежности систем проблема оценки ритмичности работы оборудования не только не решается, но фактически и не поставлена. Вместе с тем вопрос этот приобретает все большее значение, особенно в условиях массового производства.

При достаточной для планового выпуска средней производительности линии неритмичность ее работы либо увеличивает вероятность в отдельные смены невыполнения плана изготовления изделий в целом (так как несвоевременная подача заготовок на сборочный конвейер приводит к остановке конвейера из-за отсутствия данной детали), либо требует наличия определенных запасов готовых деталей между обрабатывающими линиями и сборочным участком. Увеличение этих запасов деталей по каждому наименованию, входящих в собираемое изделие, позволяет сгладить эффект колебания сменных выпусков продукции, но вместе с тем увеличивает объем незавершенного производства и соответственно затраты на его хранение. Все это приводит к увеличению себестоимости продукции.

Выявление и анализ факторов, оказывающих влияние на ритмичность выпуска продукции (уровень концентрации элементарных операций, надежность узлов и режущих инструментов и способы их замены), с одной стороны, позволяют управлять ритмичностью производительности как при проектировании, так и при эксплуатации ТСМ, с другой — дают возможность обосновать с технических и экономических позиций оптимальный уровень запаса заготовок для ритмичной работы сборочного конвейера.

Для исследования этого вопроса была смоделирована работа семи различных АЛ, отличающихся числом инструментов. Каждая линия включала в себя три силовых узла, транспортное устройство и от одного до семи комплектов режущих инструментов ($n = 3 \dots 21$) с различными характеристиками надежности. Было установлено, что вследствие увеличения числа инструмента среднее значение коэффициента готовности η_r АЛ снижается с 0,86, до 0,64 и растет дисперсия производительности D_{η_r} .

Вместе с тем существенно падает с ростом концентрации операций относительное ее значение

$$k_{\eta} = \frac{D_{\eta_r}}{1 - \eta_r},$$

где $1 - \eta_r = \eta_{пр} = \frac{\sum_{\mu}^{\lambda}}{1 + \sum_{\mu}^{\lambda}}$ — коэффициент простоя; η_r — коэффициент готовности АЛ; λ — частота отказов АЛ; μ — частота восстановления АЛ.

Повышение ритмичности работы оборудования с ростом концентрации элементарных операций отмечалось и при моделировании более сложных линий. На ритмичность работы существенное влияние оказывают закон распределения времени безотказной работы элементов (особенно режущих инструментов) и способ их замены.

Анализ различных способов смены инструментов (смена по отказам, смешанная, параллельная и др.) показал (рис. 5.4), что смешанная смена инструментов при экспоненциальном распределении их стойкости значительно повышает ритмичность работы АЛ (по сравнению со сменой по отказам). Аналогичные результаты получены для параллельной смены. Наиболее ритмичная работа линии при профилактической смене инструментов, распределение стойкости которых близко к нормальному закону.

Таким образом, метод моделирования позволяет на стадии проектирования технологических систем исследовать влияние параметров надежности их элементов на ритмичность работы системы. Анализируя различные структуры и компоновки систем и изменяя характеристики элементов, можно управлять ритмичностью работы. Метод позволяет также изучать влияние законов надежности элементов на производительность системы и себестоимость изготовления деталей.

Определим аналитически ритмичность работы отказывающей и восстанавливаемой станочных систем (типа изучавшихся выше с помощью моделирования) за промежуток времени длительностью T . Пусть $Q_{пл}$ — запланированный выпуск системы в этом интервале времени; Q — номинальная производительность системы; $Q(T)$ — фактический выпуск системы за время T .

При фиксированном значении T фактический выпуск системы является случайной величиной, причем $0 < Q(T) < QT$. Запас деталей, компенсирующий неустойчивость работы системы, нужен, очевидно, только в тех случаях, когда система не справляется с планом выпуска, и запас $X(T)$ при этом следует находить из соотношения $X(T) = QT - Q_{пл} - Q(T)$. Видно, что $X(T)$ — случайная величина; хорошее приближение для распределения вероятностей величины $X(T)$ при достаточно больших значениях T (например для интервалов длительностью в смену $T = T_{см}$) можно получить для среднего объема компенсирующего запаса:

$$\bar{X}(T) = Q \sqrt{\beta T} \left[\Delta \Phi(\Delta) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\Delta^2/2} \right], \quad (4.30)$$

где

$$\beta = \eta^3 \left\{ 2 \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \frac{\Gamma \left(1 + \frac{2}{b} \right)}{\left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right) \right]^2} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\mu_j \bar{t}_j} \right\};$$

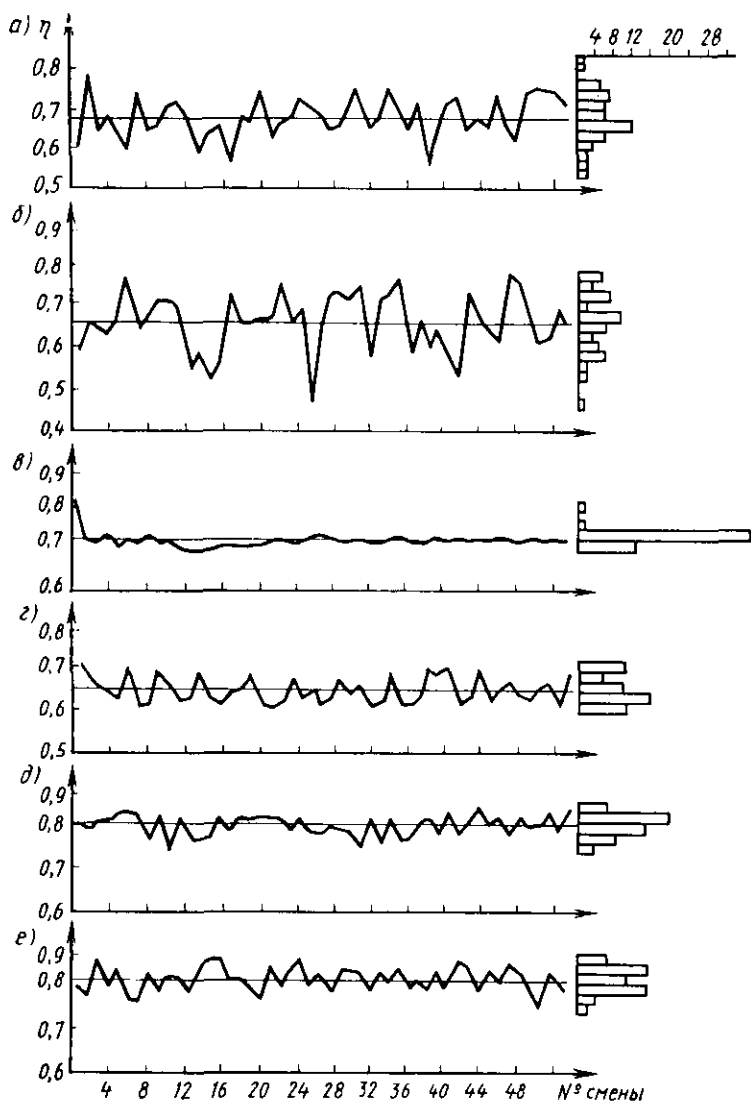


Рис. 5.4. Влияние способов замены инструментов на устойчивость работы АЛ ($b=3$):

а, б — замена по отказам; в, г — параллельная замена; д — смешанная замена; е — жесткая профилактика

$\Phi(\Delta)$ — функция Лапласа;

$$\Delta = |Q_{пл} - \bar{Q}(T)| / (2 \sqrt{\beta T}), \quad Q(T) = Q \bar{\eta} T;$$

$$\bar{\eta} = \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\mu_j \bar{t}_j} \right)^{-1},$$

где $\bar{t}_j$ — среднее время замены j -го инструмента.

Отметим, что дисперсия фактического выпуска системы за время T

$$D_Q(T) = Q^2 \beta T.$$

В частном случае, когда плановое задание совпадает со средним выпуском станочной системы за время T , т. е. при $Q_{пл} = \bar{Q}(T)$, средний объем компенсирующего запаса вычисляют с помощью формулы [получаемой из выражения (4.30) при $\Delta = 0$]

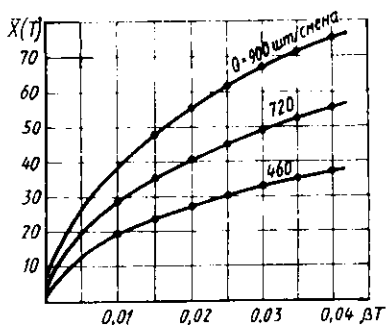
$$\bar{X}(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{Q^2 \beta T}.$$

Таким образом, даже если исходя из средней производительности станочная система может обеспечить выполнение плана, то для компенсации неритмичности ее выпуска необходимо иметь запас деталей, пропорциональный стандартному отклонению (квадратному корню из дисперсии) фактического выпуска. Рис. 5.5 иллюстрирует зависимость среднего объема компенсирующего запаса $\bar{X}(T)$ от дисперсии βT фактического выпуска при разных Q .

Моделирование работы автоматических линий из участков с гибкой связью. Основу математической модели работы линии с гибкой связью составляют модели работы сблокированных АЛ — синхронно работающих участков, которые рассматривают как простейшие элементы станочной системы, характеризующиеся своими законами распределения времени безотказной работы и времени восстановления работоспособности. Взаимосвязи отдельных участков в линии устанавливают с помощью количественных соотношений, учитывающих взаимодействие последовательно и последовательно-параллельно работающих агрегатов и магазинов-накопителей между ними, компенсирующих часть простоев оборудования.

Разработаны два варианта программы.

Рис. 5.5. Зависимость величины запаса $\bar{X}(T)$ от $Q\alpha T$ и βT при одинаковой цикловой производительности станочной линии и линии сборки



Первый позволяет моделировать линии, состоящие из l последовательно работающих участков. Он составлен для однопоточной линии, т. е. такой линии, каждый участок которой представляет собой цепочку станков.

Второй вариант составлен для многоучастковой многопоточной линии, т. е. каждый участок может состоять из двух — пяти одинаковых потоков.

Участки станков на линии соединены последовательно, потоки работают параллельно, т. е. при остановке одного из потоков остальные потоки данного участка продолжают работать, но производительность участка при этом уменьшается. После каждого участка имеется бункер-накопитель заготовок с максимальной минутной емкостью:

$$U_{\max} = Z_{\max} T_{\text{ц}},$$

где $Z_{\max}$ — максимальное число заготовок в накопителе.

Если участки работоспособны (участок работоспособен, если хотя бы один из j потоков работоспособен), уровень заготовок в бункерах зависит от пропускной способности участков и может уменьшаться или увеличиваться. Если все потоки на всех участках работают, то число деталей в бункерах неизменно при условии, что производительности участков равны. Заготовки передаются от одного участка к другому, минуя накопитель. Если n -й участок отказал, то $(n - 1)$ -й участок может работать, подавая заготовки в бункер B_{n-1} и бункер наполняется до состояния $U_{B_{n-1}} = U_{\max}$, если до этого момента не ликвидирован отказ на n -м участке, то участок $(n - 1)$ -й останавливается, возникает наложенный простой длительностью $\tau_{\text{пр}}$ n -го участка на $(n - 1)$ -й участок.

Участок $(n + 1)$ -й после остановки n -го участка продолжает работать до того момента, пока в бункере B_n есть заготовки ($U_{B_n} > 0$). При $U_{B_n} = 0$ $(n + 1)$ -й участок останавливается, возникает наложенный простой длительностью τ' n -го участка на $(n + 1)$ -й участок вследствие отсутствия запаса заготовок.

Наложенные простои могут передаваться от первого участка к последнему и наоборот.

На схеме (рис. 5.6) описаны возможные состояния одной элементарной структуры линии, включающей три последовательно расположенных участка (с номерами $n - 1$, n , $n + 1$), с двумя накопителями после участков $n - 1$ и n . Меняя значения n , можно анализировать состояние линии (в данном случае рассматривается однопоточное исполнение $j = 1$) для любого числа участков n .

Соответствующие блоки ЭВМ формируют случайные числа $\tau_{\text{раб}}$, $\tau_{\text{пр}}$, распределенные по заданным законам. Другие блоки ведут расчет длительности работы участков с учетом наложенных простоев, вызванных как отсутствием заготовок в бункере, расположенном до участка, так и переполнением бункера, стоящего за рассматриваемым

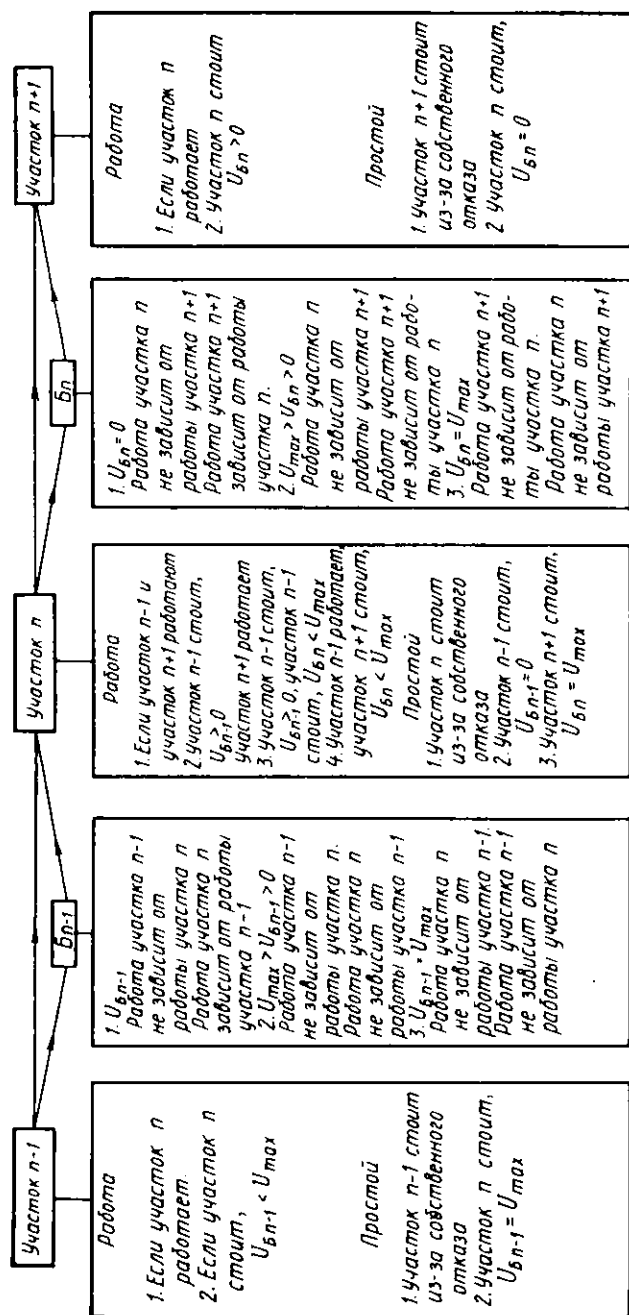


Рис. 5.6. Схема возможных состояний элементарной структуры линии

участком. При этом время работы и время простоев участков связывают следующие соотношения:

длительность работы участка n

$$t_{n \text{ раб}} = \tau_{n \text{ раб}} - (\tau'_{n \text{ пр}} + \tau''_{n \text{ пр}});$$

общая длительность простоя участка

$$t_{n \text{ пр}} = \tau_{n \text{ пр}} + \tau'_{n \text{ пр}} + \tau''_{n \text{ пр}};$$

длительность наложенного простоя участка n вследствие отсутствия заготовок ($U_{B_{n-1}} = 0$)

$$\tau'_{n \text{ пр}} = \tau_{n-1 \text{ пр}} - U_{B_{n-1}};$$

длительность наложенного простоя участка из-за переполнения бункера ($U_{B_n} = \text{макс}$)

$$\tau''_{n \text{ пр}} = \tau_{n+1} - (U_{B_n \text{ макс}} - U_{B_n});$$

минутная емкость бункера

$$U_{B_0} \rightarrow \max = t_{n \text{ кон. раб}} - t_{n+1 \text{ кон. раб}} = T_{ц} Z;$$

$$U_{B_{\text{макс}}} \rightarrow 0 = t_{n+1 \text{ кон. раб}} - t_{n \text{ кон. раб}} = T_{ц} Z.$$

Таким образом, ЭВМ имитирует функционирование линии с учетом случайных значений времени работы отдельных ее участков, случайного времени их восстановления, а также в зависимости от запаса заготовок в бункерах-накопителях в каждый конкретный момент времени.

Моделирование работы автоматической линии в течение длительного времени при заданных характеристиках надежности участков, емкости бункеров позволяет определить средние статистические значения основных ее показателей применительно к рассматриваемой структуре. При работе многопоточной, многоучастковой линии вследствие уменьшения пропускной способности одного из участков в случае отказов оборудования или инструментов уменьшается пропускная способность последующих или предыдущих участков. Номер отказавшего потока j_n на участке n выбирают на основании закона равной вероятности. В большинстве случаев емкости нулевого бункера U_{B_0} и последнего U_{B_M} принимались равными соответственно ∞ и 0, т. е. предполагалось, что заготовки всегда имеются в наличии, а детали всегда увозят на сборку (склад деталей всегда пуст).

В программе моделирования предусмотрено, что комплекс автоматических линий обслуживается бригадой из N наладчиков ($N = 1 \dots 14$). Если на каком-либо участке (потоке) произошел отказ, наладчик немедленно приступает к его ликвидации. Если число отказавших участков превышает число наладчиков, возникает очередь из отказавших станков. После того как очередной наладчик освобождается, он приступает к устранению отказа на очередном потоке другого участка.

Предусматриваются две стратегии обслуживания станков наладчиками: в первом случае освободившийся наладчик приступает к обслуживанию того потока, который отказал раньше других; во втором случае обслуживание ведется с приоритетом: оно начинается на том потоке, где время устранения отказа минимально (максимально).

Исходными данными для моделирования являются:

среднее время (мин) безотказной работы каждого потока $\bar{t}_{\text{раб } nj}$ и показатель степени b в формуле (4.29а) ($0,5 \leq b \leq 4$);

доля отказов ϵ_{nj} из-за неисправности оборудования;

среднее время (мин) ремонта оборудования $\bar{t}_{\text{обн } j}$;

среднее время (мин) замены инструментов $\bar{t}_{\text{инн } j}$;

максимальная минутная емкость бункеров $U_{\text{Бн макс}}$ и начальное значение $U_{\text{Бн } 0}$;

число наладчиков N , обслуживающих линию;

длительность (мин) цикла $T_{\text{цн } j}$;

общая длительность (мин) моделирования $T_{\text{общ}}$.

Задается также структура линии (число участков M и число потоков j_n каждого участка).

На печать выводится:

общая длительность (мин) полезной работы каждого потока $\Sigma t_{\text{раб } nj}$;

длительность (мин) собственных простоев каждого потока по вине оборудования $\Sigma t_{\text{обн } j}$;

число отказов оборудования потока $K_{\text{обн } j}$;

длительность (мин) собственных простоев каждого потока из-за смены инструментов $\Sigma t_{\text{инн } j}$;

число отказов из-за инструментов $K_{\text{инн } j}$;

длительность (мин) наложенных простоев $\Sigma t'_{\text{нал } n}$ каждого участка вследствие того, что предыдущий бункер пуст;

длительность (мин) наложенных простоев $\Sigma t''_{\text{нал } n}$ каждого участка из-за того, что последующий бункер полон;

длительность (мин) простоев потока nj вследствие ожидания наладчика $\Sigma t_{\text{ож } nj}$;

коэффициент готовности каждого потока

$$\eta_{г nj} = \frac{\Sigma t_{\text{раб}}}{\Sigma t_{\text{раб}} + \Sigma t_{\text{об}} + \Sigma t_{\text{ин}}};$$

коэффициент технического использования каждого потока

$$\eta_{т. и nj} = \frac{\Sigma t_{\text{раб}}}{\Sigma t_{\text{раб}} + \Sigma t_{\text{об}} + \Sigma t_{\text{ин}} + \Sigma t'_{\text{нал } n} + \Sigma t''_{\text{нал } n}};$$

коэффициент полного использования каждого потока

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\Sigma t_{\text{раб}}}{\Sigma t_{\text{раб}} + \Sigma t_{\text{об}} + \Sigma t_{\text{ин}} + \Sigma t'_{\text{нал } n} + \Sigma t''_{\text{нал } n} + \Sigma t_{\text{ож}}};$$

часовая производительность каждого потока

$$Q_{\pi} = \frac{\sum t_{\text{раб}}}{T_{\pi} T_{\Phi}} = \frac{60}{T_{\pi}} \eta_{\Sigma};$$

распределение заготовок в бункере, полученное за время моделирования.

Общее число заготовок, обработанных на каждом потоке за период T_{Φ} моделирования,

$$\sum Q_{nj} = \frac{\sum t_{\text{раб } nj}}{T_{\pi} nj}.$$

Кроме того, при укрупненных расчетах по формуле (стр. 153) подсчитывается себестоимость изготовления деталей.

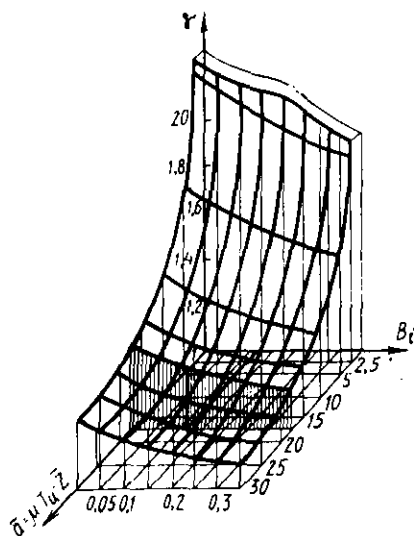


Рис. 5.7. График для определения коэффициента γ наложения потерь при работе линии, состоящей из десяти участков ($n=10$)

Использование рассматриваемых моделей позволило решить ряд теоретических вопросов и выполнить экспериментальные исследования проектируемых компоновок АЛ. В частности, анализ методов расчета АЛ показал, что современное состояние теории позволяет выполнить расчет линии практически самой сложной компоновки. Однако использование рассмотренных методов на предварительной стадии проектирования, когда необходимо одновременно оценить большое число вариантов возможных решений, затруднительно из-за сложности и большой трудоемкости расчетов.

Вместе с тем основная трудность расчета как автоматических, так и поточных линий со сложной структурой состоит в определении коэффициента γ наложения потерь всеми предыдущими участками на выпускающий. Массовое моделирование вариантов компоновок одно- и многопоточных линий позволило экспериментальным путем найти значение функции $\gamma = f(B, n, \bar{a})$ и построить соответствующие графики для $n = 2 \dots 14$. На рис. 5.7 в качестве примера дан график для поточной линии, состоящей из десяти участков ($n = 10$). Эти графики по известным удельной длительной настройке каждого участка $B = \lambda/\mu$, обобщенному запасу заготовок между участками $\bar{a} = \mu T_{\pi} \bar{z}$, для заданного n позволяют определить значение γ , а по значению n —

производительность однопоточной линии (шт/ч) при условии, что $B_1 = B_2 = \dots = B_n$, по формуле

$$Q = \frac{60}{T_{\text{ц}}} \frac{1}{1 + B_n \gamma}$$

На основании эмпирически установленной связи, согласно которой число потоков m на каждом участке уменьшает коэффициент наложения простоев на $\gamma^{1/\sqrt{m}}$, производительность многопоточной линии

$$Q = \frac{60}{T_{\text{ц}}} \frac{1}{1 + B_n \gamma^{1/\sqrt{m}}},$$

где γ определяется по графикам для заданных значений n, B_n .

Сопоставление результатов расчета производительности линий с данными моделирования показало их хорошее соответствие. Дальнейшая проверка разработанного графоаналитического метода показала возможность его использования для расчета производительности линий, состоящих из станков разной надежности ($B_1 \neq B_2 \neq \dots \neq B_n$). Формулы для расчета коэффициента технического использования $\eta_{\text{т.л.}}$ линий приведены в табл. 5.1 (γ определяется по графикам).

Таблица 5.1. Формулы для расчета коэффициента технического использования автоматических линий

Соотношение удельной длительности простоев участков АЛ	Линия	
	Однопоточные ($n > 0; m = 1$)	Многопоточные ($n > 1; m > 1$)
$B_1 = B_2 = \dots = B_n$	$\eta = \frac{1}{1 + B_n \gamma}$	$\eta = \frac{1}{1 + B_n \gamma^{1/\sqrt{m}}};$
$B_1 \approx B_2 \approx \dots \approx B_n$ ($\Delta B < 15\%$)	$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n} \gamma}$	$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n} \gamma^{1/\sqrt{m}}}$
$B_1 \neq B_2 \neq \dots \neq B_n$ ($\Delta B > 15\%$)	$\eta_{\text{мин } i, n-i} = \frac{1}{1 + B_i \gamma_i}$	$\eta_{\text{мин } i, n-i} = \frac{1}{1 + B_i \gamma_i^{1/\sqrt{m}}}$

Обозначения: B_i, B_n — удельная длительность простоев соответственно i -го участка, n -го участка; m — число потоков на последнем участке.

Таблица 5.2. Формулы для расчета производительности АЛ

Тип	№ участка			
	1	2	i	n-1
—		$\bar{a}_2^{(1)} = \frac{Z_{m1}}{2}$ $= \mu_2 T_{112}$	$\bar{a}_i^{(1)} = \frac{Z_{mi}^{(i-1)}}{3}$ $= \mu_i T_{11i}$	$\bar{a}_{n-1}^{(1)} = \frac{Z_{m(n-1)}}{2}$ $= \mu_{n-1} T_{11n}$ $\frac{Z_{m(n-1)}}{2}$
	$c_1^{(1)} = \frac{1}{1+B_1}$	$c_2^{(1)} = \frac{1}{1+B_2 \gamma_n (a_2^{(1)}, B_1)}$	$c_i^{(1)} = \frac{1}{1+B_i \gamma_n (a_i^{(1)}, B_i)}$	$c_n^{(1)} = \frac{1}{1+B_n \gamma_n (a_n^{(1)}, B_n)}$
	$\bar{a}_1^{(2)} = \mu_1 T_{111} \cdot \frac{Z_{m1}}{2}$	$\bar{a}_2^{(2)} = \frac{Z_{m2}}{2}$ $= \mu_2 T_{112}$	$\bar{a}_i^{(2)} = \frac{Z_{mi}}{2}$ $= \mu_i T_{11i}$	—
$c_1^{(2)} = \frac{1}{1+B_1 \gamma_n (\bar{a}_1^{(2)}, B_1)}$	$c_2^{(2)} = \frac{1}{1+B_2 \gamma_n \bar{a}_2^{(2)}, B_2)}$	$c_i^{(2)} = \frac{1}{1+B_i \gamma_n (\bar{a}_i^{(2)}, B_i)}$	$c_{n-1}^{(2)} = \frac{1}{1+B_{n-1} \gamma_n \times (\bar{a}_{n-1}^{(2)}, B_{n-1})}$	$c_n^{(2)} = \frac{2}{1+B_n}$
$K_1^{(1)} = \min \{C_1^{(1)}, C_1^{(2)}\}$	$K_2^{(1)} = \min \{C_2^{(1)}, C_2^{(2)}\}$	$K_i^{(1)} = \min \{C_i^{(1)}, C_i^{(2)}\}$	$K_{n-1}^{(1)} = \min \{C_{n-1}^{(1)}, C_{n-1}^{(2)}\}$	$K_1^{(1)} = \min \{C_n^{(1)}, C_n\}$

№ участка

1	2	i	n-i	n
—	$\bar{a}_2^{(1)} = \frac{T_{112}}{\mu_1} \frac{z_{m1}}{m_2} \frac{1}{2}$	$\bar{a}_1^{(1)} = \frac{T_{111}}{\mu_i} \frac{z_{m(i-1)}}{m_i} \frac{1}{2}$	$\bar{a}_{n-1}^{(1)} = \mu_{n-1} \frac{T_{11(n-1)}}{z_{m(n-2)}} \times \frac{1}{2}$	$\bar{a}_n^{(1)} = \frac{T_{11n}}{\mu_n} \frac{z_{m(n-1)}}{m_n} \frac{1}{2}$
$B'_1 = m_1 B_1$	$B'_2 = m_2 B_2$	$C'_i = m_i B_i$	$B'_{n-1} = m_{n-1} B_{n-1}$	$B'_n = m_n B_n$
$c_1^{(1)} = \frac{1}{1+B'_1}$	$c_2^{(1)} = \frac{1}{1+B'_2} \left[\gamma_n \times \frac{1}{\sqrt{m_2}} \right] \frac{1}{\sqrt{m_2}}$	$c_i^{(1)} = \frac{1}{1+B'_i} \left[\gamma_n \times \frac{1}{\sqrt{m_i}} \right] \frac{1}{\sqrt{m_i}}$	$c_{n-1}^{(1)} = \frac{1}{1+B'_{n-1}} \left[\gamma_n \times \frac{1}{\sqrt{m_{n-1}}} \right] \frac{1}{\sqrt{m_{n-1}}}$	$c_n^{(1)} = \frac{1}{1+B'_n} \left[\gamma_n (a_n^{(1)}) \times \frac{1}{\sqrt{m_n}} \right] \frac{1}{\sqrt{m_n}}$
$\bar{a}_1^{(2)} = \mu_0 \frac{z_m}{m_1} \frac{1}{2}$	$\bar{a}_2^{(2)} = \mu_2 \frac{T_{112}}{m_2} \frac{z_{m2}}{2}$	$\bar{a}_i^{(2)} = \mu_i \frac{T_{11i}}{m_i} \frac{z_{mi}}{2}$	$\bar{a}_{n-1}^{(2)} = \mu_{n-1} \frac{T_{11(n-1)}}{m_{n-1}} \times \frac{1}{2}$	—
$c_1^{(2)} = \frac{1}{1+B'_1} \left[\gamma_n \times \frac{1}{\sqrt{m_1}} \right] \frac{1}{\sqrt{m_1}}$	$\bar{c}_2^{(2)} = \frac{1}{1+B'_2} \left[\gamma_n \times \frac{1}{\sqrt{m_2}} \right] \frac{1}{\sqrt{m_2}}$	$c_i^{(2)} = \frac{1}{1+B'_i} \left[\gamma_n \times \frac{1}{\sqrt{m_i}} \right] \frac{1}{\sqrt{m_i}}$	$c_{n-1}^{(2)} = \frac{1}{1+B'_{n-1}} \left[\gamma_n \times \frac{1}{\sqrt{m_{n-1}}} \right] \frac{1}{\sqrt{m_{n-1}}}$	$c_n^{(2)} = \frac{1}{1+B'_n}$
$\eta_1^{(2)} = \min \{ c_1^{(1)}, c_1^{(2)} \}$	$\eta_2^{(2)} = \min \{ c_2^{(1)}, c_2^{(2)} \}$	$\eta_i^{(2)} = \min \{ c_i^{(1)}, c_i^{(2)} \}$	$\eta_{n-1}^{(2)} = \min \{ c_{n-1}^{(1)}, c_{n-1}^{(2)} \}$	$\eta_n^{(2)} = \min \{ c_n^{(1)}, c_n^{(2)} \}$

МНОГОЭТАПНАЯ

Структура

Таким образом, на основании данных моделирования и определения значения γ можно на стадии оценки вариантов компоновочных решений достаточно точно (погрешность определения $\eta_{т.н}$ не более 0,5–1,5 %) и с минимальными затратами времени рассчитать ожидаемую производительность оборудования.

Аналогично, используя графики $\gamma = f(B, n, \bar{a})$, можно рассчитать производительность линий с параллельно работающими участками (табл. 5.1). Результаты расчета показали, что предельные значения погрешности Δn в этом случае составляют 0,5–1,0 %. Таким образом, на основе данных моделирования и определения значения γ можно на стадии оценки вариантов компоновочных решений достаточно точно и с минимальными затратами времени рассчитать ожидаемую производительность оборудования. Последовательность расчета производительности линий показана в табл. 5.2, а примеры расчета — в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Пример расчета производительности многопоточной АЛ

№ участка			
1	2	3	4
—	$\bar{a}_2^{(1)} = \frac{1}{7} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{70}{2} = 7,5$	$\bar{a}_3^{(1)} = \frac{1}{7} \cdot \frac{12}{4} \cdot \frac{70}{2} = 15$	$\bar{a}_4^{(1)} = \frac{1}{7} \cdot \frac{6,75}{3} \times \frac{70}{2} = 11,25$
$B_1' = 3B_1 = 0,25$	$B_1' = 2B_2 = 0,19$	$B_3' = 4B_3 = 0,33$	$B_4' = 3B_4 = 0,25$
$c_1^{(1)} = \frac{1}{1+0,25} = 0,8$	$c_2^{(1)} = \frac{1}{1+0,19 \cdot 1,4} = 0,805$	$c_3^{(1)} = \frac{1}{1+0,33 \cdot 1,2} = 0,734$	$c_4^{(1)} = \frac{1}{1+0,25 \cdot 1,3} = 0,774$
$\bar{a}_1^{(2)} = \frac{1}{7} \cdot \frac{6,75}{3} \times \frac{70}{2} = 11,25$	$\bar{a}_2^{(2)} = \frac{1}{7} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{70}{2} = 7,5$	$\bar{a}_3^{(2)} = \frac{1}{7} \cdot \frac{12}{4} \cdot \frac{70}{2} = 15$	—
$c_1^{(2)} = \frac{1}{1+0,25 \cdot 1,3} = 0,774$	$c_2^{(2)} = \frac{1}{1+0,19 \cdot 1,4} = 0,805$	$c_3^{(2)} = \frac{1}{1+0,33 \cdot 1,2} = 0,734$	$c_4^{(2)} = \frac{1}{1+0,25} = 0,8$
$\eta_1^{(2)} = \min \{0,8; 0,774\} = 0,774$	$\eta_2^{(2)} = \min \{0,805; 0,805\} = 0,805$	$\eta_3^{(2)} = \min \{0,735; 0,734\} = 0,734$	$\eta_4^{(2)} = \min \{0,774; 0,8\} = 0,774$

Пример 5.1. При выборе структурно-компоновочной схемы нужно рассчитать производительность однопоточной ($m = 1$) шестиучастковой АЛ ($n_{\gamma} = 6$)

с близкими значениями потерь B_i участков (рис. 5.8). Между участками расположены накопители вместимостью $Z = 70$ деталей. Среднее время восстановления участков $\tau_B = 7$ мин; длительность цикла обработки ($T_{ц}$) на всех участках одинакова и равна 2,5 мин.

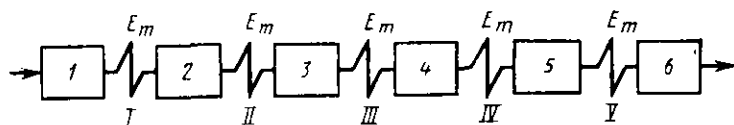


Рис. 5.8. Структура АЛ:

1 — 1-й участок с потерями $B_1=0,123$; 2 — 2-й участок с $B_2=0,132$; 3 — 3-й участок с $B_3=0,104$; 4 — 4-й участок с $B_4=0,096$; 5 — 5-й участок с $B_5=0,111$; 6 — 6-й участок с $B_6=0,123$; I—V — накопитель между участками одинаковой вместимости ($U_m=70$ деталей)

Производительность АЛ

$$Q = \frac{60}{T_{ц}} \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n} \gamma}$$

Для определения γ вычислим среднее значение внецикловых потерь $\bar{B}$ и обобщенную величину вместимости накопителей $\bar{a}$:

$$\bar{B} = \sum_{i=1}^6 B_i / 6 = (0,123 + 0,132 + 0,104 + 0,096 + 0,111 + 0,123) / 6 = 0,114;$$

$$\bar{a} = \frac{1}{\tau_{рем}} T_{ц} \frac{Z_{макс}}{2} = 1/7 \cdot 2,5 \cdot 70 / 2 = 12,5.$$

Для полученных значений $\bar{B}$ и $\bar{a}$ для $n = 6$ определим $\gamma = 1,265$. По формуле (табл. 5.1) вычислим производительность АЛ

$$Q = 60 / 2,5 \cdot 1 / (1 + 0,114 \cdot 1,265) \approx 20,9 \text{ шт/ч.}$$

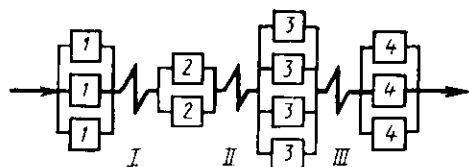


Рис. 5.9. Структура АЛ:

I—4 — потоки соответствующего участка; I—III — номера накопителей ($U_m=70$)

Пример 5.2. Необходимо рассчитать производительность многопоточной и многоучастковой АЛ. Линия состоит из четырех участков ($n = 4$) со следующими параметрами (рис. 5.9): $\tau_{пр} = 7$ мин; $U_{max} = 70$ шт.

1-й участок 2-й участок 3-й участок 4-й участок

Число m_i потоков на участке	3	2	4	3
Потери $m_i B_i$ времени всего участка	0,25	0,19	0,33	0,25
Рабочий цикл $T_{ц}$ на одном потоке, мин	2,25	1,50	3,00	2,25

Расчеты коэффициента технического использования АЛ сведены в табл. 5.2. На основании расчетов, приведенных в табл. 5.3, производительность АЛ

$$Q = 60 \cdot 4 \cdot 0,73/3 \approx 58,4 \text{ шт/ч.}$$

§ 5.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНХРОННЫХ СБОРОЧНЫХ ЛИНИЙ

Современные сборочные линии значительно отличаются от линии для обработки деталей, особенно в части компоновочных схем и видов транспортных устройств. На смену синхронным линиям (СЛ) с жесткой связью между позициями пришли несинхронные линии (НСЛ), имеющие гибкие связи между агрегатами. Они позволяют в одном потоке успешно сочетать сборочные операции, выполняемые как автоматически, так и вручную. Как правило, такие линии состоят из отдельных (модульных) рабочих позиций, соединенных между собой замкнутым непрерывно движущимся транспортным устройством с «плавающими» приспособлениями-спутниками, на которых размещаются собираемые детали. Отсутствие жесткой связи между приспособлением-спутником и транспортером, наличие свободного пространства между рабочими позициями позволяют создавать небольшие запасы собираемых изделий, обеспечивающие независимую (несинхронную) работу позиций.

В машиностроении применяются два типа НСЛ: с горизонтально и вертикально замкнутыми транспортерами. Во втором случае возврат приспособлений-спутников на первую позицию осуществляется транспортером, расположенным снизу, внутри станин сборочных агрегатов. В качестве движущего элемента обычно используют цепь или ленту, иногда приводные и гравитационные лотки (см. гл. 1).

НСЛ обладают рядом достоинств, способствующих их широкому внедрению, а именно:

- на одной линии можно производить сборку изделий нескольких модификаций в произвольном порядке;

- при большой разнице в длительности отдельных операций можно построить участки из дублирующих позиций без введения специальных «ветвящихся» транспортных систем;

- можно встраивать дополнительные позиции уже в действующие в производстве линии, что позволяет перейти от ручной сборки к автоматической или увеличивать производительность линий путем дублирования лимитирующих позиций;

НСЛ недороги в изготовлении и проще в монтаже, чем СЛ, так как не требуют высокой точности взаимного расположения позиций и исключают необходимость в применении традиционных схем блокировок.

Применение НСЛ улучшает условия труда, так как исключает непосредственную синхронизацию действий рабочего с темпом работы механизмов, тем самым снижая утомляемость и нервное напряжение оператора, вызванное опасением не выполнить определенный комплекс работ за отведенное время.

Однако основным преимуществом НСЛ является производительность на 10—30 % более высокая, чем у синхронных линий. Объясняется это тем, что на сборочных синхронных линиях собираемое изделие перемещается с позиции на позицию только после окончания операций на всех позициях и задержка выполнения операции на одной позиции ведет к задержке работы всей линии. Как правило возникновение таких задержек связано с рассеиванием времени выполнения ручных операций, а также с отказами механизмов на автоматических позициях. Дело в том, что производительность сборщика колеблется в определенных пределах и зависит от многих факторов, часть из которых постоянно изменяется (степени усталости, настроения, квалификации, условий труда рабочего, качества собираемых деталей и т.п.).

На НСЛ собираемые изделия между позициями перемещаются сразу же после окончания выполнения операции, независимо от степени готовности операций на других позициях, а ритмичность работы достигается путем использования межоперационных заделов (небольшого числа спутников с собираемыми изделиями, которые находятся между позициями). Другими словами, при остановке или задержке в работе какой-либо позиции остальные продолжают работать еще некоторый промежуток времени (до истечения запасов в предыдущем накопителе или до заполнения последующего).

Возможность получения большей производительности при использовании НСЛ по сравнению с СЛ при одной и той же длительности выполнения элементарных сборочных операций иллюстрируется циклограммами работы линий двух типов (рис. 5.10, а, б). Из рис. 5.10, в, г видно, что за один и тот же фонд времени T_p при одном и том же количестве и длительности τ_n простоев позиций НСЛ выполнила 12 рабочих циклов, т.е. на четыре цикла больше СЛ, за счет сокращения дополнительных простоев τ'_n и τ''_n . Рассмотренные циклограммы относятся к линиям с автоматическим выполнением операций на рабочих позициях $P_1 \dots P_4$. В случае применения на отдельных позициях операций, выполняемых вручную, из-за рассеивания времени на ручных операциях циклограммы получаются более сложными, а эффективность работы НСЛ возрастает.

На рис. 5.11 показана типичная кривая распределения времени t_p выполнения операции ручной сборки на одной из позиций линии. Как показывают результаты обследования ряда сборочных линий, экспериментальные данные хорошо аппроксимируются теоретическим распределением Гаусса. Возвращаясь к рис. 5.10, можно отметить, что во всех случаях, когда t_p больше t'_p , СЛ будут простаивать, а на НСЛ большая часть этих простоев будет скомпенсирована за счет межоперационных запасов.

Практика эксплуатации НСЛ у нас в стране и за рубежом показала, что фактическая производительность линии может изменяться в довольно широких пределах и зависит от величины и соотношения параметров, определяющих ее компоновочные характеристики: количества рабочих позиций, их надежности, рассеивания времени выполнения

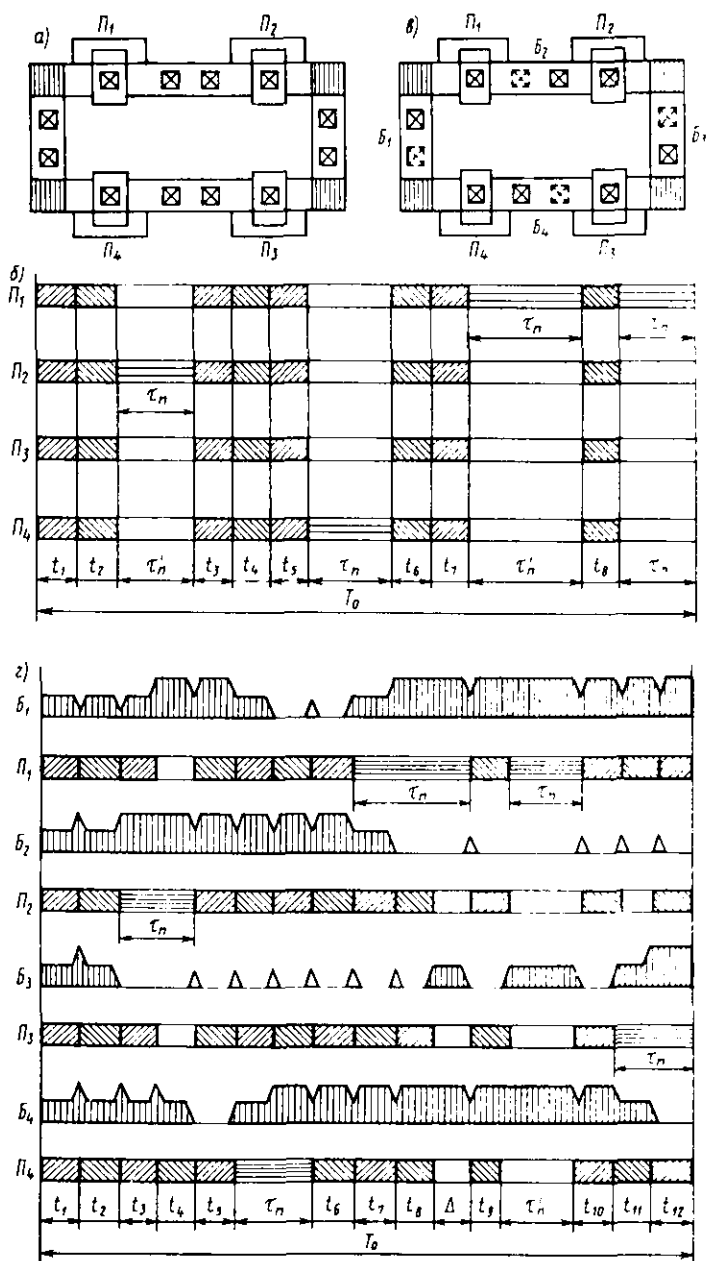
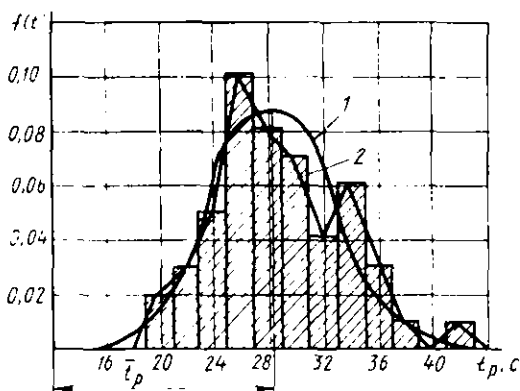


Рис. 5.10. Схемы сборочных линий (а, б) и циклограммы их работы (б, г):
 а — СЛ; б — НСЛ; Π_1 – Π_4 — рабочие позиции; δ_1 – δ_4 — межоперационные запасы собираемых изделий; t_i — длительность i -го цикла сборки изделий; τ_n — длительность собственного простоя; τ_{Π}^1 — длительность вынужденного простоя

Рис. 5.11. Распределение времени t_p выполнения операции ручной сборки на линии:

1 — теоретическая и 2 — экспериментальные кривые; t_p — среднее значение случайной величины t_p



отдельных ручных операций, емкости межоперационных накопителей и т.п. Таким образом, очень важно оценить производственные возможности НСЛ уже на стадии проектирования, так как ошибки в определении ожидаемой производи-

тельности могут повлечь за собой дополнительные расходы средств и времени для внесения изменений по результатам промышленных испытаний, либо неоправданное завышение стоимости линии из-за усложнения ее структуры, неполной загрузки оборудования, увеличения габаритных размеров, производственных площадей и металлоемкости конструкции. Важно также выбрать рациональную структуру и параметры линии, обеспечивающие заданную программу выпуска изделий требуемого качества с наименьшими стоимостными затратами.

Методы расчета станочных автоматических линий с гибкими связями не могут быть использованы для расчета НСЛ, так как не учитывают специфику сочетания работы автоматических и ручных сборочных позиций, поэтому одновременно с исследованием особенностей функционирования НСЛ разработан* универсальный графо-аналитический метод расчета, позволяющий уже на ранней стадии проектирования, с минимальными затратами времени и средств, но с достаточной точностью оценивать производительность и надежность НСЛ.

Метод основан на допущении, что удельная величина наложенных простоев B_{ni} , передаваемых с рассматриваемой позиции на лимитирующую, есть величина постоянная, зависящая только от технических характеристик рассматриваемых позиций и суммарной емкости накопителей, расположенных между ними, и не зависит от количества, расположения и технических характеристик других рабочих позиций, входящих в состав линии.

Величина B_{ni} определяется по формуле

$$B_{ni} = \frac{\sum \Delta i}{\sum t}.$$

* См.: Дашенко А. И., Золотухин А. И. Оптимизация компоновочных схем несинхронных сборочных линий на основе анализа их производительности и надежности // Вестник машиностроения. 1984. № 7. С. 45-49.

где $\Sigma \Delta_i$ — суммарное время простоев лимитирующей позиции из-за отказов i -й позиции; Σt — общее время работы.

Результаты исследований подтвердили правильность выдвинутой гипотезы. Разница в значениях B_{ni} при самых разнообразных вариантах построения НСЛ не превышала 0,01—0,05.

Для расчета коэффициента готовности НСЛ по предлагаемому графо-аналитическому методу используется формула

$$\eta_r = \frac{1}{1 + B_l + \sum_{i=1}^n (B'_{ni} + B''_{ni})}, \quad (5.1)$$

где B_l — удельная длительность ремонта лимитирующей позиции линии; B'_{ni} , B''_{ni} — удельные коэффициенты наложения потерь i -й позиции на лимитирующую; n — количество рабочих позиций в линии.

Расчет надежности и производительности проектируемой НСЛ состоит из следующих этапов.

Вначале определяется лимитирующая позиция линии. Ею будет позиция, имеющая небольшую величину удельной длительности ремонта. Если таких позиций несколько, то за лимитирующую принимается позиция, около которой располагаются накопители с меньшей емкостью.

Отказ рассматриваемой позиции может влиять на лимитирующую l -ю позицию, распространяясь как в прямом (по ходу сборки), так и в обратном направлении, так как НСЛ имеют замкнутую структуру. Поскольку для каждой позиции по формулам (5.2) и (5.3) подсчитываются два значения $\hat{Z}'_i$ и $\hat{Z}''_i$, равных суммарной емкости накопителей, отделяющих позицию от лимитирующей, то

$$\hat{Z}'_i = \begin{cases} \sum_{k=l+1}^l Z_k & \text{для } i < l; \\ \sum_{k=i+1}^n Z_k + \sum_{k=1}^l Z_k & \text{для } i > l; \\ 0 & \text{для } i = l; \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\hat{Z}''_i = \begin{cases} \sum_{k=l+1}^n Z_k + \sum_{k=1}^l Z_k & \text{для } i < l; \\ \sum_{k=i+1}^l Z_k & \text{для } i > l; \\ 0 & \text{для } i = l. \end{cases} \quad (5.3)$$

Далее, для автоматических позиций подсчитываются два значения обобщенного коэффициента запаса изделий $\widehat{a}_i$ и $\widehat{a}_i^*$ по формуле

$$a_i = k_i \mu_i \tau_{\text{д}} Z_i, \quad (5.4)$$

где μ_i — параметр потока восстановлений i -й позиции; $\tau_{\text{д}}$ — такт работы линии, мин; k_i — коэффициент заполнения накопителя.

По подсчитанным величинам $\widehat{a}_i$ и B_i на основании графиков, представленных на рис. 5.12, определяются значения коэффициентов B_{ni} для всех автоматических позиций. При этом величина B_{ni} , подставляемая в формулу (5.1), складывается из суммы двух значений B_{ni} и B_{ni}^* , определяемых по $\widehat{a}_i$ и $\widehat{a}_i^*$.

Для ручных позиций величина B_{ni} также складывается из двух значений B_{ni} и B_{ni}^* , она определяется по графикам рис. 5.13 на основании подсчитанных ранее значений $\widehat{Z}_i$ и $\widehat{Z}_i^*$, а также R_i — коэффициента рассеивания времени выполнения операции на позиции. Эта величина определяется экспериментально и равна отношению $\sigma_i \tau_{pi}$.

Графики, показанные на рис. 5.12 и 5.13, а также аналогичные, но для других значений B_i , получены в результате обработки результатов статистического моделирования на ЭВМ работы более 1500 вариантов сборочных линий, отличающихся структурно-компоновочными схемами и значениями основных параметров. Для конкретной проектируемой линии подсчитывают значения τ , B_i , R_i , $\widehat{Z}_i$, $\widehat{a}_i$, по соответствующим графикам определяют η_r для расчета производительности линии.

Сравнение данных расчета и результатов моделирования работы для тех же линий показало, что абсолютная погрешность определения η_r не превышает 1—1,5% (см. табл. 5.4).

Разработанная методика расчета была неоднократно апробирована при проектировании автоматизированной несинхронной линии для сборки топливного насоса высокого давления двигателя КамАЗ.

На линии выполняются следующие операции:

- ручная загрузка корпуса в приспособление-спутник, установка таблички и жиклера, укладка деталей в перегружатели к пуансонам пресса (позиция 1);
- автоматическая запрессовка трех штифтов и трех осей (позиция 2);
- автоматическое клеймение порядкового номера в двух плоскостях (позиция 3);
- автоматическое завертывание четырех резьбовых пробок (позиция 4);
- автоматическое завертывание 16 шпилек (позиции 5 и 6);
- загрузка шпилек в кассеты и ручной съем подсобранного корпуса (позиция 7).

Исходные технические характеристики автоматических позиций, используемые при расчете, вначале были назначены (табл. 5.4) по ана-

логии с действующим в производстве оборудованием, а затем на основании испытаний механизмов линии.

Параметры, характеризующие работу ручных позиций — среднее время выполнения операций и коэффициент рассеивания, — получены на основании хронометража отдельных переходов, проведенного как в лабораториях, так и в производственных условиях непосредственно на постах действующего конвейера. После внедрения линии на

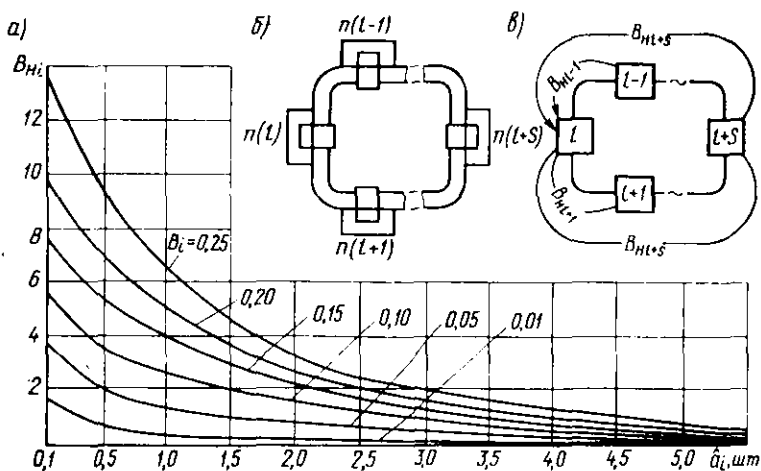


Рис. 5.12. Зависимость наложенных простоев B_{H_i} автоматических позиций от величины запаса $\hat{a}_i$ изделий

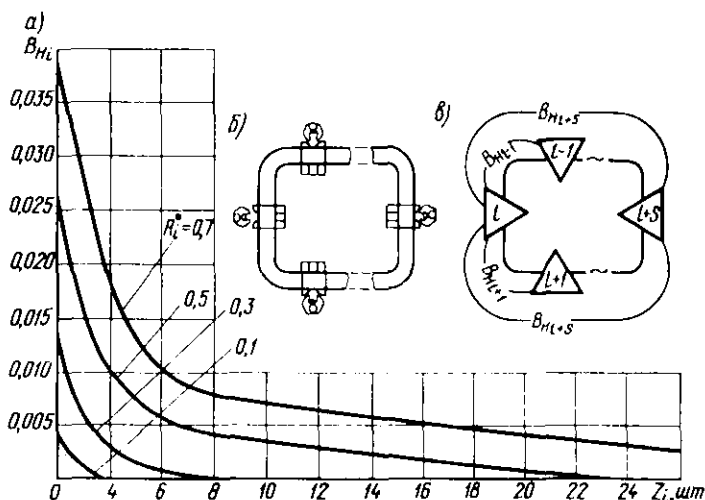
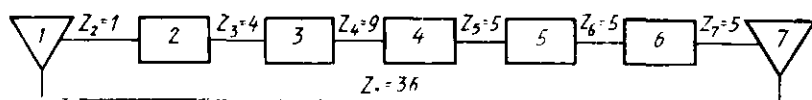


Рис. 5.13. Зависимость наложенных простоев B_{H_i} позиций ручной сборки от штучного запаса изделий Z_i

Таблица 5.4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по несинхронной линии для сборки топливного насоса высокого давления двигателя КамАЗ



№ позиции	Вид позиции	Технические характеристики рабочих позиций, назначенные при проектировании линии					Расчетные значения	
		Z_i	τ_i	B_i	μ_i	R_i	η_r	Q_r , шт/ч
1	Р	36	0,60	—	—	0,30	0,805	74,32
2	А	1	0,50	0,06	0,46			
3	А	4	0,23	0,04	0,06			
4	А	9	0,27	0,09	0,22			
5	А	5	0,65	0,17	0,42	0,30		
6	А	5	0,65	0,17	0,42			
7	Р	5	0,60	—	—			

Продолжение табл. 5.4

№ позиции	Вид позиции	Технические характеристики рабочих позиций, полученные в результате наблюдения за линией после ее внедрения					Расчетные значения		Фактические значения	
		Z_i	τ_i	B_i	μ_i	R_i	η_r	Q_r , шт/ч	η_r	Q_r , шт/ч
1	Р	36	0,60	—	—	0,18	0,826	76,2	0,818	75,52
2	А	1	0,50	0,075	0,317					
3	А	4	0,23	0,093	0,209					
4	А	9	0,27	0,111	0,248					
5	А	5	0,65	0,106	0,270	0,23				
6	А	5	0,65	0,111	0,303					
7	Р	5	0,43	—	—					

Обозначения: Р — позиция ручной сборки; А — позиция автоматической сборки.

Ярославском заводе дизельной аппаратуры было проведено ее обследование, которое позволило выявить фактические показатели производительности и надежности отдельных позиций и линии в целом. После этого на основании полученных технических характеристик отдельных позиций по разработанной методике был выполнен повтор-

ный расчет линии (табл. 5.4). Практически точность получаемых результатов зависит только от точности задаваемых исходных данных.

Методика расчета была также использована при проектировании комплекса линий для общей сборки двигателя новой модели автомобиля «Запорожец». Полученные результаты позволяют не только выполнить расчет конкретной линии, но и провести сравнение ряда конкурирующих решений, в том числе выбрать оптимальные структурнокомпоновочные схемы сборочных линий.

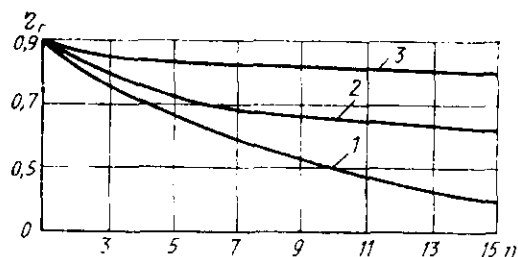


Рис. 5.14 Зависимость коэффициента готовности η_g линии от числа n автоматических позиций:

$t_{pi}=1$ мин; $B_i=0,1$; $\mu_i=0,2$

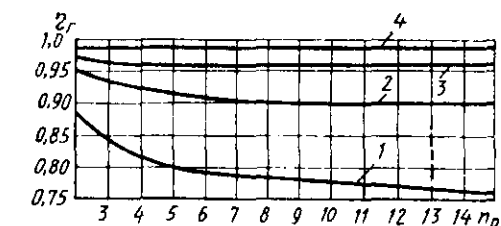


Рис. 5.15. Зависимость коэффициента готовности η_g линии от числа n_p ручных сборочных позиций:

$t_{pi}=1$ мин; $R_i=0,25$; 1 — СЛ; 2 — НСЛ; $Z_i=4$; 3 — НСЛ, $Z_i=16$; 4 — НСЛ, $Z_i=2$

(рис. 5.15), так как при ручной сборке позиции линии практически не подвержены длительным отказам.

Особенность функционирования НСЛ определяется тем, что они являются замкнутыми, т. е. поток деталей, входящих с последней позиции линии, одновременно является входящим потоком для первой позиции. Таким образом, возможны ситуации, когда отказ на первой позиции сразу же приводит к остановке последней позиции, при этом другие позиции линии в этот момент могут продолжать работу, или, наоборот, отказ на последней позиции приводит к остановке первой.

Эта особенность НСЛ также оказывает влияние на выбор ее структуры. Например, включение в состав прямоточной синхронной линии накопителя достаточно большой емкости позволяет практически ликвидировать влияние друг на друга отказов групп позиций, располо-

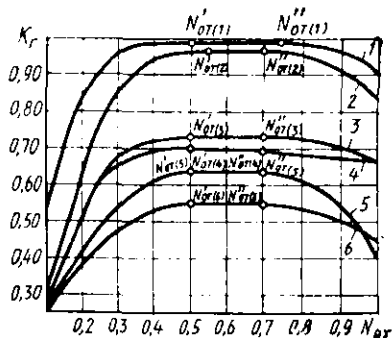
женных в конкурирующих решениях, в том числе выбрать оптимальные структурнокомпоновочные схемы сборочных линий.

На рис. 5.13, 5.14, например, показаны сравнительные данные, характеризующие изменение коэффициента готовности η_g сборочных линий с различными параметрами. Графики на рис. 5.14 построены для линий с автоматическими сборочными позициями, на рис. 5.15 — для позиций ручной сборки. Как видно из графиков, синхронные линии (кривые 1) во всех случаях обеспечивают меньший уровень надежности и, следовательно, меньшую производительность, что подтверждает правильность выводов, сделанных на основе рис. 5.10.

Снижение η_g с ростом числа позиций n_p значительно меньше (рис. 5.14), чем для автоматических позиций

Рис. 5.16. Зависимость коэффициента готовности η_r сборочной линии от коэффициента заполнения линии приспособлениями-спутниками:

1 - НСЛ из пяти позиций ручной сборки, $Z_i=4$; $R_i=0,25$; $t_{pi}=1$ мин; 2 - НСЛ из пяти автоматических позиций, $Z_i=4$; $B_i=0,1$; $t_{pi}=1$ мин; $\mu_i=0,2$; 3 - НСЛ из автоматических позиций, $Z_i=4$; $B_i=0,1$; $t_{pi}=1$; $\mu_i=0,2$



женных по обеим сторонам от данного накопителя. Однако включение такого же накопителя в состав НСЛ значительно меньше сказывается на величине η_r . Объясняется это тем, что отказ в работе любой позиции распространяется как в прямом (по ходу сборки), так и в обратном направлении, а данный накопитель может перекрыть только одно из возможных направлений распространения отказа и совершенно не снижает влияние отказа в другом направлении.

На коэффициент готовности НСЛ также оказывает влияние количество приспособлений-спутников N_c , используемых в линии. Эту зависимость можно проследить по графикам, представленным на рис. 5.16. Для удобства сравнения различных вариантов на графике

по оси абсцисс отложена величина $N_{от}$, равная $N_0 \sum_{i=1}^n Z_i$ и указывающая, какая часть транспортера занята приспособлениями-спутниками $\left(\sum_{i=1}^n Z_i \right.$ — общее число мест на транспортере линии) Как видно, зави-

симость η_r от $N_{от}$ можно разделить на три фазы. Вначале при увеличении $N_{от}$ от 1 до некоторого значения $N'_{от}$ величина η_r также увеличивается, затем η_r достигает своей максимально возможной величины и в интервале $[N'_{от}; N''_{от}]$ практически не изменяется. Далее, начиная с $N''_{от}$ наблюдается уменьшение η_r . Объясняется это тем, что в первой фазе для заполнения всех межоперационных накопителей количества приспособлений-спутников не хватает и на линии преобладают дополнительные простои из-за отсутствия деталей на позициях. В третьей фазе, наоборот, приспособлений-спутников слишком много, и они переполняют межоперационные накопители, тем самым снижая их эффективность.

Таким образом, чтобы добиться от НСЛ максимально возможной производительности, необходимо, чтобы количество используемых на линии приспособлений-спутников находилось в пределах $[N'_{от}; N''_{от}]$ «оптимального интервала».

Значения критических точек $N'_{от}$ и $N''_{от}$, а также величина «оптимального интервала» во многом зависят от величин Z_i , B_i , R_i и др. Правильный выбор количества приспособлений-спутников также важен с экономических позиций, так как это оказывает значительное

влияние на стоимость линии. Исследования позволили выработать некоторые общие рекомендации по проектированию НСЛ.

Таким образом, в состав НСЛ целесообразно включать не более 6—8 автоматических позиций, после чего необходимо располагать накопитель для компенсации простоев.

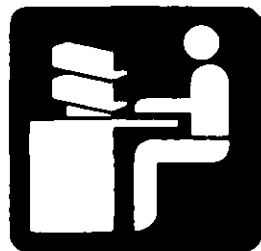
Удельная длительность настройки B_i большинства автоматических позиций, входящих в состав линии, должна быть не более 0,10 ... 0,15. При этом конструкция механизмов должна обеспечивать минимальное время на устранение возникающих отказов, т. е. величина $\mu_i = 1/t_{рем}$ должна быть в пределах 0,2—1,0.

Межоперационные накопители необходимо равномерно размещать вдоль линии, а их емкость должна быть рассчитана на 3—5 изделий. Такая емкость накопителей позволяет почти полностью исключить взаимное влияние позиций ручной сборки и значительно снизить дополнительные простои автоматических позиций практически без увеличения габаритов линии. В случае наличия в линии автоматических позиций с низким коэффициентом технического использования целесообразно емкости накопителей, расположенных по обе стороны от этих позиций, увеличить до 7—10 деталей.

Количество приспособлений-спутников, используемых на линии, ориентировочно должно составлять 35—55 % от суммарной емкости всех накопителей, входящих в состав линии. Меньшие значения берутся для НСЛ с вертикально замкнутым транспортером.

Производительность НСЛ с вертикально замкнутым транспортером на 3—5 % выше, чем производительность аналогичной горизонтально замкнутой НСЛ, благодаря наличию в их составе транспортера возврата приспособлений-спутников, одновременно служащего для накопления межоперационных заделов. Таким образом, обоснованный выбор оптимального варианта компоновки проектируемой НСЛ возможен на основе соотношений, связывающих производительность с параметрами, характеризующими структуру линии при точном определении ее производительности на основе разработанного метода.

Гибкое автоматизированное оборудование для мелкосерийного и серийного производства



Глава 6

СИСТЕМНЫЙ ХАРАКТЕР ГИБКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

§ 6.1. ПРОСТЫЕ И СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ

Ретроспективный анализ производственных процессов и научных работ в области производства свидетельствует о том, что развитие производства происходит неравномерно, преимущественно дается отдельным его составляющим (например, станкам с ЧПУ, роботам), которые имеют высокий уровень и эффективность. Менее исследованные составляющие производства представляют собой потенциальный резерв для улучшения функциональных характеристик и эффективности производственного процесса. Отсутствие системности в развитии производственных процессов не отвечает требованиям сегодняшнего дня. Настоятельной потребностью является их гармоничное развитие на базе теорий систем. Гибкое автоматизированное производство имеет отчетливо выраженный системный характер и объединяет средства производства и информационную технику в новую технологию.

В новом подходе к проектированию находят отражение положения науки о системах и системные подходы, формулируются правила идентификации и оптимизации существующих и проектируемых новых систем. Системный подход основывается на том, что исследование и моделирование объекта включает в себя его разложение на элементарные элементы и их исследование с точки зрения функционального влияния и использования в структуре системы. С точки зрения однородности структуры различают четыре основных типа систем: стандартные, хорошо структурированные, слабо структурированные и неструктурированные. Все системы можно разделить на простые (однанные, составные) и сложные.

Простыми или *детерминированными* называются системы, конструкция и функция которых основываются на применении известных физических, технологических и других закономерностей.

В машиностроительном производстве системы состоят из большого числа однородных элементов, входящих в небольшое число групп классификации. Между элементами существуют *относительно простые* связи. Системы характеризуются как составные, и у них совокупность элементов исследуется как единое целое. Закономерности функционального поведения составных систем можно исследовать и математически описывать.

Суть сложных систем, к которым относится гибкое производство, описывается в теории систем. Наиболее важные признаки сложной системы:

- зависимость функционирования системы от окружающих объектов;
- целесообразность применения сложной системы в достижении одной или группы важных целей;
- постоянное изменение внутренних процессов в системе и необходимость их стабилизации;
- принцип адаптивности, который основывается на фиксации изменчивости процессов в системе и на стабилизации процесса;
- информационный характер процессов в системе, у которых всегда существует определенная степень «новизны», «неожиданности». Этот характер проявляется как процесс передачи и обмена информацией внутри системы и во взаимосвязи с окружающими объектами;
- отсутствие определенности, которое характерно для многих сложных систем;
- сложные системы, как правило, создаются как продукция единичного производства.

Следствием развития сложных систем являются интеллектуальные системы, которые связаны с окружающими объектами и могут воспринимать информацию, поступающую от окружающих объектов, обрабатывать ее и составлять план и программы своей работы. Примером являются системы взаимодействия типа CAD, CAE и т.п. Гибкие производственные системы могут также иметь элементы искусственного интеллекта.

Часто возникает необходимость распознать простые, сложные и интеллектуальные системы. Наиболее простой способ заключается в применении алгоритмов. В алгоритмах функционирования простых систем используются только исполнительные блоки, а в алгоритмах сложных систем — также блоки принятия решения. Для интеллектуальных систем характерно существование дерева принятия решений. Принятие решения является основным признаком, по которому проводится классификация и распознавание границ между простыми, сложными и интеллектуальными системами.

Учения о системном подходе и их применение в инженерно-проектных работах представлены в системотомии, системотологии и системотехнике. В настоящее время повышается роль проектного подхода, формируемого на теоретической базе системотологии, позволяющей изучать существующие и моделировать те системы материального характера, которые предстоит создавать.

Модели делятся на антиципационные, имитационные и оптимизирующие и могут отображать материальные и признаковые концепции.

Представление о конкретной производственной системе может основываться на топологической модели функций производственного процесса, в котором признаки системного логического мышления можно раскрыть в соответствии со следующими определениями:

1. Множество функций представляет собой множество функциональных модулей.

2. Функции являются атрибутом своих носителей. Носители имеют материальный характер (оборудование и информационная техника).

3. Функции в производственном процессе реализуются на объектах производства. Их можно отобразить в виде воздействия оператора на операнды.

4. Атрибутом воздействий операторов являются изменения свойств, положения и места объектов производства. Логическими результатами воздействий операторов на объекты производства являются информационные, технологические, манипуляционные и транспортно-складские операции и функции.

5. Атрибутом воздействий операторов информационной процесологии являются информационные связи.

Каждую систему целесообразно идентифицировать по следующим признакам: функции и их носители, область выполнения функций и операций носителей, алгоритмы работы, организация и человек в системе.

§ 6.2. СВОЙСТВА И ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

На проектирование производственных систем влияет качество элементов и подсистем нижнего уровня (станки с ЧПУ, роботы, системы управления). Качество производственных систем имеет различные проявления. Процесс повышения качества учитывает упорядочение его признаков:

R --- стабильность или надежность функционирования (reliability);

I --- стойкость против искаженной информации (information);

C --- управляемость (controlability);

L --- самоорганизация (learning).

Стабильность работы производственных систем является условием экономического эффекта. Простые системы (оборудование без систем управления) имеют пассивные формы стабильности: стойкость (рабо-

та без отказов, высокая долговечность), сбалансированность (регулярная, ритмичная работа). Активными формами стабильности являются надежность и гибкость. Важнейшим проявлением стабильности является надежность, которая заключается в сохранении структурного равновесия функций системы.

Функциональное поведение системы в течение длительного промежутка времени характеризуется способностью преодолевать различные ситуации. В значительной мере оно зависит от способности приспособляться к новым условиям. Производственные системы наиболее часто приспособляются к изменениям изделий.

Гибкость производственных систем характеризуется способностью принимать извне различные виды объектов производства и быстро приспособлять к их производству свою работу.

В поведении систем часто рассматривается их очевидная и потенциальная эффективность. Очевидная эффективность характеризуется так называемыми *синергическими эффектами качества*, суть которых заключается в получении более высокого эффекта, каким является простая сумма эффектов подсистем структуры. Потенциальная эффективность позволяет получать новое качество системы путем изменения ее структуры. Основное ограничение, от которого зависит повышение потенциальной эффективности системы, связано с взаимодействием системы с окружающими объектами. Возникающие отказы выражаются вероятностью искажения информации. Передача сигналов происходит с определенной вероятностью $P(s) < 1$.

Вероятность декодирования функций передачи зависит от функции передачи U . Система может обрабатывать сигналы, величина которых меньше величины входных сигналов. Никакая система не может фиксировать большее число сигналов, чем передается окружающими ее объектами.

Взаимодействие системы и окружающих ее объектов носит стохастический характер, с вероятностью которого происходит изменение на входе u и выходе v . Величина $P(u, v)$ предопределяет эффективность системы, позволяет достигать цели системы A , обозначенную $\bar{A}$, путем выгодного (u, v_0) изменения или близкого (u, v) изменения. Вероятность

$$P(u, v) = P(A)$$

характеризует достижение цели системы и является ее потенциальной эффективностью. Для высоких параметров качества сложных систем был сформулирован предельный закон эффективности:

$$P(u, v) \approx \begin{cases} 0, & \text{если } v > v_0; \\ 0, & \text{если } v < v_0. \end{cases}$$

В математике известна теорема существования оптимальной системы A и среды. В этой связи возникает проблема уточнения понятия «осуществимость и реализуемость» системы.

Понятие «осуществимость» вытекает из вероятности $P(t)$ достижения цели A системы A за время t . Если известна вероятность P_0 и время T_0 достижения цели, то тогда (P_0, T_0) являются параметрами осуществимости. Система является реальной, если

$$P(T) \geq \text{и } T \leq T_0.$$

Понятие «неосуществимость» имеет более сложное определение, чем понятие «осуществимость». Необходимо ввести понятие «оптимальная система». Понятия «осуществимость» и «неосуществимость» имеют методологическое значение для системологии и формирования гибких производственных систем.

При исследовании единичных систем в производстве целесообразно исследовать также комфортность среды. При этом определяется так называемая компенсационная характеристика. Данные аспекты являются важными в том случае, если производственной системе A требуется помощь v для ее функционирования в среде B . Необходимую помощь v можно выразить в виде функции

$$v = v(u, A, B).$$

Компенсационная характеристика представляет собой функцию $\varphi = (A, B)$ и говорит о том, что система имеет или не имеет обоснование своего существования по отношению к окружающей ее среде. Компенсационная характеристика позволяет качественно оценить многие состояния перехода от нижнего уровня автоматизации к высшему.

Часто возникает проблема поддержки, которая системе необходима с точки зрения внешней среды. Разрабатываются оперативные характеристики поддержки как следствие неточного знания среды.

С точки зрения инженерной антиципации полученные системы, как правило, не отличаются идеальными свойствами и поведением. Их необходимо оптимизировать. Большое значение имеет оптимизация на базе априорных методов, которые ведут к образованию моделей и идентификации. Системы, у которых для их запуска в работу (или для их испытания) необходимо прилагать чрезмерные усилия, как правило, списываются и не запущенные в работу являются большим финансовым грузом.

§ 6.3. СТРОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Производственные системы можно определить как функционально сгруппированное производственное оборудование, объединенное материальным потоком и информационной сетью управления. В такую группу, если это необходимо, может входить деятельность человека, а также объекты производства. В состав гибких производственных систем входят:

— станки и обрабатывающие центры, оснащенные устройством автоматической смены инструмента и имеющие систему управления типа DNC или CNC;

— устройства для манипуляции и транспортное оборудование для межоперационного транспорта объектов производства, инструментов и рабочих принадлежностей;

— устройства для операционного манипулирования объектами, инструментами и рабочими принадлежностями на технологических рабочих местах;

— приспособления для подготовки, сборки объектов производства, инструменты и рабочие принадлежности;

— считывающие и блокировочные элементы, которые накапливают информацию и индицируют аварийные случаи и рабочее состояние оборудования;

— системы и подсистемы управления (микропроцессоры, микроЭВМ и т.д.);

— интерфейсные устройства, обеспечивающие работу человека с оборудованием.

При формировании конфигурации конкретной производственной системы требуется планировать процесс проектирования сверху вниз и создавать систему снизу вверх. Конкретная производственная система состоит из элементов, модулей, подсистем. Основная проблема при формировании конфигурации производственной системы связана с проектированием производственных ячеек, которые могут иметь различный вид, однако при этом они должны обладать свойством физической и информационной совместимости. Основные виды производственных ячеек должны быть предметно определенными, гибкими и использовать «безлюдную технологию». Они могут основываться на применении систем управления типа DNC или CNC. Основным модулем производственной системы могут быть также станки или роботы.

Конфигурация производственной системы определяется целями. Ее целесообразность и комплексность можно заранее оценить моделированием.

Основными факторами при рационализации и интегрировании гибких производственных систем являются материальные и информационные потоки. Совокупности функций в ГПС образуют системные комплекты, из которых наиболее важными являются:

— технологические функции (изменения физического состояния объектов производства); их носителями являются технологические системы;

— функции манипуляции и транспортные функции (положения и места нахождения объектов производства и инструментов); их носителями являются средства манипуляции и транспортные средства и они объединены в системы материальных потоков;

— функции управления, координации и синхронизации работы элементов систем и их интеграция на базе распределения и передачи сигналов команд и их интеграция в информационные потоки; их носителями являются информационная техника и средства управления.

В результате объединения таких функций, выполняемых с учетом совокупности объектов производства, получается ячейка или более

сложная система. Технологическая система в области гибкой автоматизации представлена станками с ЧПУ, технологическими центрами или технологическими модулями. Каждая технологическая система содержит инструментальную подсистему и подсистему объектов производства. В подсистему объектов производства входят также зажимные приспособления. С точки зрения конструкции важным для перемещения объектов производства и инструментов является кинематика движения.

Система манипуляции содержит функциональные группы для позиционирования и ориентации объектов производства, инструментов, измерительных средств, зажимных приспособлений и другой технологической оснастки. Кинематическая подсистема обеспечивает необходимые перемещения (вращение, наклон, линейное перемещение, зажим, погрузка в накопители и т.п.).

Транспортная система обеспечивает транспортировку всех материальных единиц между рабочими местами, ячейками, производственными системами и складами. При перемещении материалов образуются материальные потоки. Последние анализируются, рационализируются и автоматизируются. Методическим инструментом при проведении с этими целями аналитических работ и работ по синтезированию являются диаграммы Сенки (рис. 6.1), которые показывают интенсивность потоков между рабочими местами.

На диаграммах материальный поток чаще всего выражается в единицах количества (например, в виде массы m) в зависимости от единицы времени (t). Отношение m/t называется *материальным потоком*. В случае дискретных производственных процессов при определении материального потока необходимо наблюдать за ним в течение длительного периода времени.

С точки зрения рабочего места важен участок межоперационного и операционного манипулирования. Наиболее существенной частью материального потока в данном случае является поток объектов производства, автоматизации которого необходимо уделять первоочередное внимание, хотя, конечно, ни потоком инструментов, ни потоком

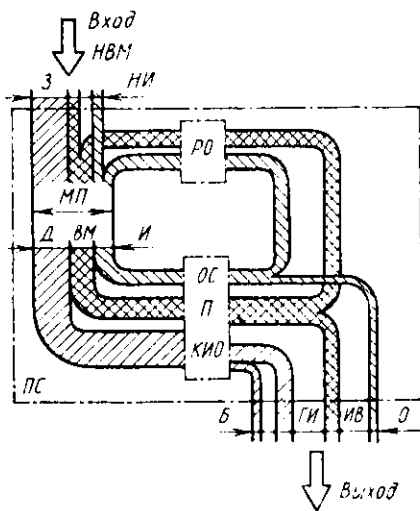


Рис. 6.1. Диаграмма Сенки материального потока:

Б — брак; ВМ — вспомогательные материалы; ГИ — готовые изделия; Д — детали; З — заготовки; И — инструмент; ИВ — инструменты на выбор; КИО — контрольно-измерительное оборудование; МП — материальный поток; НИ — новый инструмент; НВМ — новые (дополнительные) вспомогательные материалы; О — отходы; ОС — обрабатывающие станки; П — принадлежности; ПС — производственная система; РО — ремонтное оборудование

приспособлений или отходов (стружки, обрезков и т.п.) также нельзя пренебрегать. Поток объектов производства имеет наибольшую плотность, и его автоматизация является важнейшим условием непрерывного полного использования высокопроизводительных станков производственной системы. Необходимо различать поток материала на рабочем месте и его перемещение внутризаводским транспортом. Соединительным местом транспортных систем является склад рабочего места или группировки.

При объединении средств производства манипуляционные и технологические операции с точки зрения времени, пространства и массы тесно связаны друг с другом. Для объединения необходимо точное техническое и организационное определение производственного, манипуляционного и транспортного оборудования. Объединение основных технологических производственных единиц (для обработки резанием, давлением, поверхностной обработки, термообработки, сборки, складирования и т.п.) является задачей внутрицехового транспорта.

Задача системы управления и информации заключается в координации и синхронизации работы элементов и подсистем в процессе производства. Как правило, она обеспечивает управление работой двигателей, станков, управление основными и вспомогательными процессами технологической обработки объектов, перемещение и складирование материалов. При выполнении частичных перемещений и процессов должна непрерывно поступать такая информация (команды управления), которая обеспечивает необходимое временное и пространственное перемещение объекта и работу оборудования с получением требуемых выходов в форме изделий.

При проведении анализа и формировании информационных потоков применяются теории и сведения в области информационной процессологии и прежде всего — в области техники дальней связи.

Алгоритмы управления производственным процессом основываются на технологических, манипуляционных и транспортных функциях. Связь информационных функций с функциями производственной системы показана на рис. 6.2. Входные данные для алгоритмов поступают из производственных процессов. Различают категорию качества связи информационной системы с процессом материальных изменений. Данная категория выражается информационным потоком между информационной системой и системами производства, позиционирования и транспортировки объектов. Информационные потоки I , отнесенные к каналам передачи, вытекают из общего объема информационных групп A_i , из их диапазонов значений ω_j и численности появления P_j в заданные промежутки времени T , т. е.

$$I = f(A_i, \omega_j, P_j, T).$$

Для практического решения проблемы необходимо определить переменные, посредством которых можно аналитически описать информационный процесс.

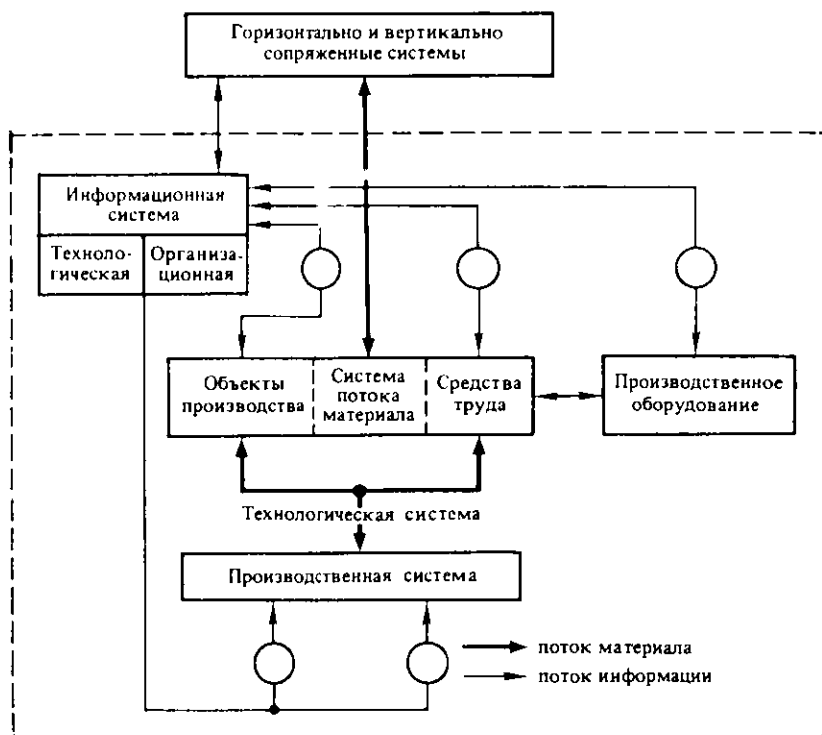


Рис. 6.2. Связь информационных и производственных функций

При применении производственного оборудования существуют основные группы информации для предмета работы, для средств производства (машины, оборудование, склады, транспортное и измерительное оборудование, инструмент, приспособления и т.п.) и для рабочей силы. В зависимости от своего действия они делятся на управляющие группы и группы состояния. В конкретных случаях составляются информационные сообщения. *Сообщение* - это информация, которой производится обмен между идентифицированными параметрами в течение времени, которое определяет выполнение части сообщения. Каждой производственной системе в соответствии с указанной схемой можно присвоить дискретное число элементов, имеющих значение 0 или 1. После этого проблема количественного выражения информационных соотношений может быть решена.

При проектировании производственных систем применяются методы прогнозирования будущих состояний (прогноз, предсказание, предвосхищение). Большое значение имеют модели, которые представляют архитектуру и конкретную конфигурацию систем. Пути, ведущие к полной автоматизации с последовательностью во времени, изоб-

ражаются, как правило, согласно логистической кривой (рис. 6.3). Процесс развития делится на три этапа:

— применение одиночных технических средств, которые обеспечивают физическую и информационную совместимость (станки с ЧПУ, роботы, системы управления, автоматизированные склады и т.п.);

— создание «островков» автоматизации, которые объединяют функции в производстве и при его подготовке в конечные открытые системы (типа CAD, CAM, CAD/CAM, гибкие производственные системы и др.);

— создание интегрированного производства с управлением от ЭВМ (СІМ). Проект СІМ называется *моделью полностью автоматизированного производства*, на основе которой развивается и конкретизируется представление о заводах будущего (рис. 6.4).

Проблема создания ГАП является прежде всего проблемой доступности физически и информационно совместимых элементов. Хотя условие физической и информационной совместимости необходимо, однако оно не является достаточным. Требуется выполнить научно-исследовательские работы и работы синтезирующего характера. При структурировании элементов производственной системы необходимо различать несколько уровней (станок, ячейка, система, линия и т.д.). Пример иерархического разложения гибкого производства показан на рис. 6.5. При данном структурировании полезно мыслить категориями функций и большой численности их носителей. Носителями являются единицы, атрибутом которых являются совокупности функций. Материальная схожесть носителей и качество закрепленных за ними функций проходят быстрое развитие.

Развитие производственных систем свидетельствует о заинтересованности в появлении в производственных процессах элементов искусственного интеллекта. Данной проблемой занимаются многие специалисты, особенно системологи и п. При ее решении требуется применение прогностических подходов. На международных конференциях пред-

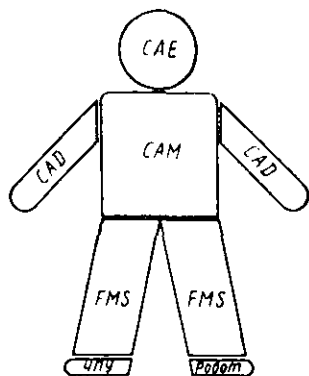
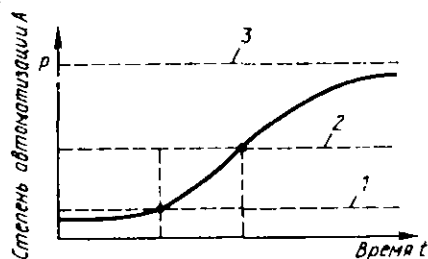


Рис. 6.3. Логистическая кривая развития автоматизации:

1 — одиночные виды техники; 2 — островки автоматизации; 3 — полная автоматизация

Рис. 6.4. Модель полностью автоматизированного производства (СІМ)

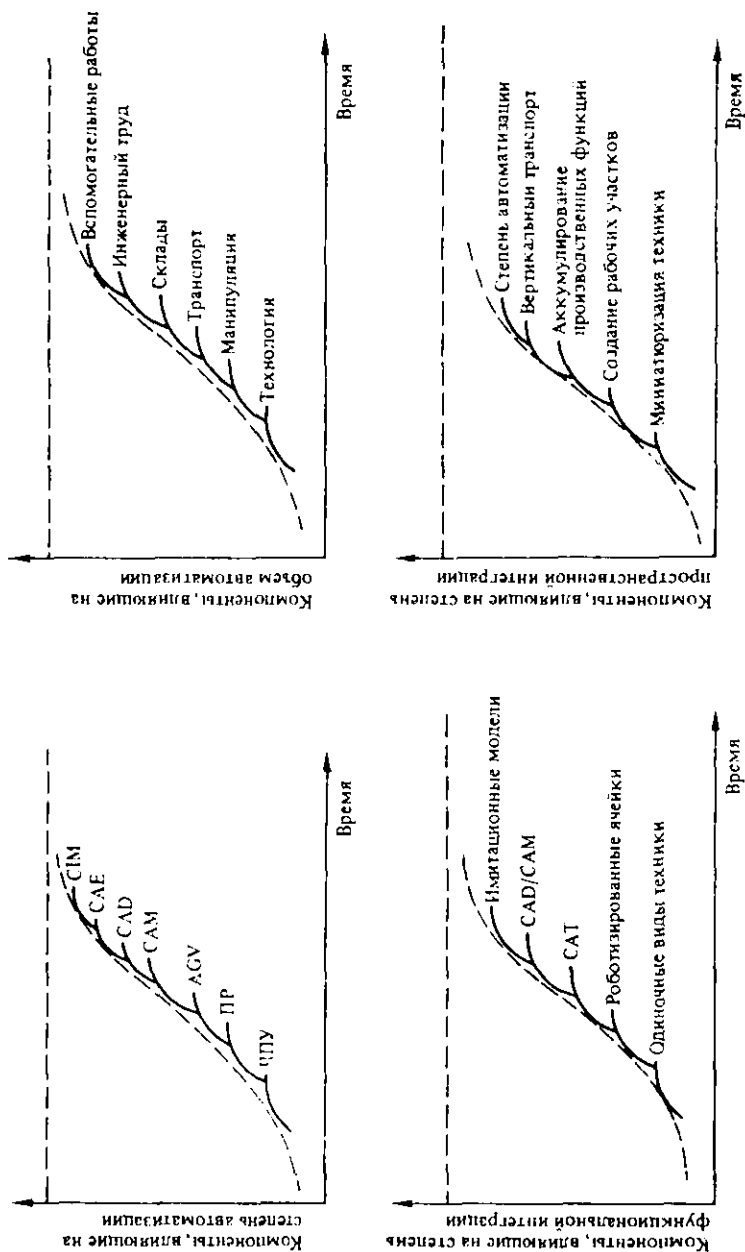


Рис. 6.5. Пример иерархического анализа гибкого производства

Развитие носителей функций гибкого производства

Обрабатывающие станки с ЧПУ

Программирование
обработки деталей

Устройство управления	Станок с ЧПУ	Обраба- тывающий центр	«Безлюд- ная тех- нология»	Рабочий участок
Обрабатывающий станок				
Манипулирование инструментом				
Работа с объектами по принципу «безлюдной технологии»				
Фиксация состояний инструментов и объектов на мониторе				

Промышленные работы

Программирование перемещения

Устройство управ- ления	Промышленный робот	Адаптивный робот	Интеллектуаль- ный робот
Манипулятор			
Сенсорные датчики и зрительное восприятие			
Экспертная система			

Системы управления

Технологические функции

Манипуляционные функции	CNC	Управление рабочими участками	CAM
Накопители			
Применение мониторов и контроль			
Интерфейс для транспорта			
Диспетчирование			
Планирование производственных заданий			
Управление транспортом			

лагается ряд частичных прогнозов (производство деталей машин, сборка и управление производством, ЭВМ, используемые в производстве, промышленные роботы). Эти прогнозы используют как вспомогательный материал при разработке совокупных прогнозов. В прогнозе делается акцент на 45 признаков состояний и временных признаков. Признаки делятся по трем основным областям: представление и обработка производственной информации, использование данной информации в производстве и развитие элементов и самих производственных систем. В наброске прогноза учитываются результаты развития техники в области искусственного интеллекта, а также определяются признаки для внедрения данных результатов в производственный процесс.

§ 6.4. ПРОГРАММНАЯ УНИВЕРСАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГИБКИМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Актуальность проблемы универсализации. Чем шире внедряются в различных областях народного хозяйства гибкие автоматизированные производства (ГАП), тем очевиднее становится необходимость повышения интеллектуальности их системы управления (СУ). Повышение интеллектуальных возможностей СУ ГАП достигают аппаратным или программным способом. При аппаратном способе увеличения интеллектуальности система управления ГАП расширяется путем подключения к ней специальных интеллектуальных аппаратных модулей, представляющих собой микропроцессорные системы с операционными средствами, памятью и соответствующим интерфейсом. При программном способе адаптивные элементы подключают в специальное программное обеспечение управляющих ЭВМ ГАП.

Специальное (прикладное) программное обеспечение (СПО) управляющих ЭВМ ГАП представляет собой совокупность программных комплексов (ПК), материализующих в ЭВМ правила формализованной переработки производственной информации, обобщающих закономерности процессов управления производством и опыт управления, накопленный персоналом управления производством. Однако включение в СПО системы управления ГАП адаптивных элементов в сильной степени усложняет решение задачи оперативного перехода системы управления ГАП с одной технологии на другую, т.е. усложняет обеспечение требований к гибкости СУ ГАП.

Гибкость системы управления современных ГАП применительно к смене технологии достигается прежде всего перепрограммируемостью управляющих ЭВМ ГАП, которая в конечном счете сводится к модификации каких-то свойств, характеристик, составных элементов или к замене в целом всего специального программного обеспечения СУ.

На первых этапах автоматизации производственных процессов с целью обеспечения гибкости СУ для каждой конкретной технологии из числа заданной группы технологий разрабатывался свой алгоритм управления и соответствующий этому алгоритму вариант специального программного обеспечения (будем этот подход к созданию СПО

управления называть специализированным). Однако опыт показал, что это требует больших затрат времени и средств. Действительно, по сложности своего функционирования каждый вариант СПО управления ГАП, тем более с адаптивными элементами, приближается к операционной системе современной ЭВМ, время разработки которой независимо от числа привлекаемых для этого специалистов составляет 3—4 года, а стоимость разработки превышает стоимость создания самой ЭВМ, т. е. стоимости аппаратной части ЭВМ без общесистемного программного обеспечения.

Одним из эффективных путей обеспечения гибкости СПО системы управления ГАП при повышении ее интеллектуальных возможностей является универсализация СПО. В данном случае под универсализацией понимается создание СПО в виде типовых, в некотором смысле универсальных, программных комплексов, каждый из которых решает одну задачу типовой структуры процесса управления и может с помощью человека в режиме диалога с ЭВМ конкретизироваться (перестраиваться) на различные технологии производства. При этом конкретизация типовых ПК может проводиться в управляющей ЭВМ ГАП или ЭВМ автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП). В последнем случае типовые ПК после конкретизации загружаются в управляющие ЭВМ системы управления ГАП по каналам связи.

Следует особо подчеркнуть, что для мелкосерийного и единичного производства универсализация СПО управления ГАП может оказаться не только способом повышения эффективности автоматизации технологических операций, но и необходимым условием этой автоматизации. Такая ситуация характерна для случаев, когда процесс модификации СПО из-за недостаточного быстрого действия не успевает «отслеживать» изменяющуюся технологию, что в конечном счете может привести к невыполнению запланированных технологических операций, тем более такие ситуации будут характерными для систем управления ГАП с интеллектуальными возможностями, когда объем их СПО по сравнению с неинтеллектуальными увеличивается в десятки и сотни раз.

Универсализация СПО управления помимо обеспечения гибкости актуальна также и по следующим причинам:

- открывается возможность более широкой кооперации разработчиков СПО, работающих в области автоматизации различных производственных процессов;

- расширяется возможность модификации СПО на основе информации, накапливаемой в процессе реального производства.

При аппаратном способе увеличения интеллектуальности системы управления ГАП также возникают проблемы, связанные с обеспечением гибкости управления к смене технологии. Их можно решить путем разработки перенастраиваемых на нужную технологию аппаратных модулей системы управления, в том числе и интеллектуальных. В связи с этим процесс создания перенастраиваемых типовых программных комплексов специального программного обеспечения управ-

ляющих ЭВМ в рамках общей идеи универсализации СПО в дальнейшем будем называть *программной универсализацией системы управления ГАП*, а процесс создания перенастраиваемых аппаратных модулей — *аппаратной универсализацией системы управления ГАП*.

Следует подчеркнуть, что вопросы программной универсализации СУ ГАП находятся еще только в стадии формулирования проблемы и разработки некоторых достаточно частных подходов к ее решению.

Основные принципы универсализации. Непосредственной разработке типовых программных комплексов системы управления ГАП в рамках общей идеи его универсализации предшествует системно-структурный анализ технологических процессов ГАП и процессов управления.

Общие принципы проведения системно-структурного анализа технологических процессов (ТП) подробно рассмотрены в [2]. В соответствии с этими принципами технологический процесс можно представить в виде совокупности технологических маршрутов (М), связанных между собой определенными отношениями: временными, пространственными, логическими и т. д. Каждый технологический маршрут расчленяется на отдельные составляющие — технологические операции (О), связанные между собой также временными, пространственными, логическими и другими отношениями. В свою очередь, каждая операция расчленяется на технологические пере-

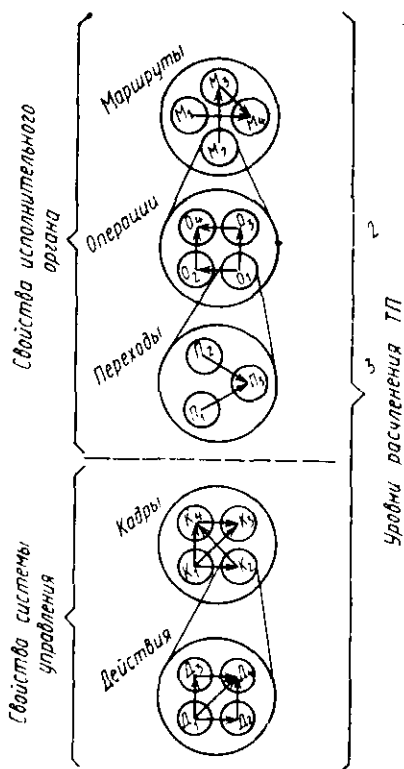


Рис. 6.6. Типовая структура технологического процесса

ходы (П). Переходы расчленяются на технологические ходы и т. д. (рис. 6.6). При этом целесообразно различать два типа свойства технологического процесса, определяющих глубину его расчленения на составляющие элементы. К первому типу относятся свойства, определяемые функциональными возможностями исполнительных органов ГАП, а ко второму — свойства, определяемые его системой управления.

Вначале расчленяются технологические процессы по первому типу свойств, а затем — по второму.

Элементы расчленения технологического процесса по свойствам исполнительного органа ГАП являются базовыми элементами, из ко-

торых составляется управляющая программа (УП) ГАП. При этом предполагается, что технологический процесс расчленяют по свойствам исполнительного органа до тех пор, пока входной и выходной векторы состояния станут характеризоваться параметрами только пространственного состояния исполнительных органов или параметрами функционального состояния. В первом случае полученный элемент расчленения технологического процесса будем называть *элементом движения*, а во втором случае — *элементом функционирования исполнительного органа ГАП*.

Одним из эффективных путей организации автоматического управления производством является создание на этапе разработки АСТПП базовой модели технологического процесса ГАП, представляющей собой множество типовых маршрутов, расчлененных в соответствии с рассмотренной выше иерархией на составные элементы технологического процесса. При этом под типовым маршрутом будем понимать маршрут, который характеризуется:

- именем;
- уровнем распределения функций по управлению между человеком и автоматическими средствами системы управления ГАП;
- составом привлекаемых средств ГАП (технологического оборудования, вычислительной техники и т.п.) и функциональной структурой их взаимодействия;
- условиями, необходимыми для реализации маршрута (требуемым объемом информации обратного канала управления, степенью участия в управлении людей и т.п.);
- заданным ограничением на использование ресурсов (по заготовкам, энергетике и т.д.);
- заданным ограничением по времени отработки маршрута;
- заданными отношениями между элементами маршрута (операциями, переходами, рабочими ходами и т.д.);
- заданным жестким форматом управляющей программы (кадрами, командами).

Элементы технологического процесса, входящие в типовой маршрут (операции, переходы и т.д.), в дальнейшем будем называть *типовыми*.

Следующим этапом системно-структурного анализа, который проводится для заданной группы технологий в рамках общей методологии универсализации, является определение типовой структуры процесса управления ГАП. При этом под типовой структурой понимается такой базовый перечень задач управления и их взаимосвязей по управлению и информации, из которого при фиксированном составе технических средств ГАП можно получить (путем вычеркивания ненужных задач) требуемый перечень задач управления и их взаимосвязи для любой конкретной технологии.

С целью получения оптимальной типовой структуры процесса управления ГАП в рассматриваемой методологии универсализации предлагается в качестве основного подпроцесса на каждом уровне управле-

ния выбирать подпроцесс выработки решений по управлению, т. е. интеллектуальную часть управления, а не информационное обеспечение («рутинную» часть управления).

После разработки типовой структуры процесса управления необходимо для каждой из управляющих ЭВМ определить перечень типовых программных комплексов управления, т. е. определить, какая из задач управления типовой структуры будет решаться ЭВМ, а не человеком или специализированными аппаратными средствами. При этом указывается, на какой именно ЭВМ должна решаться та или другая задача управления, например мини-ЭВМ централизованного управления ГАП или микроЭВМ локального управления производственным модулем, роботизированным технологическим комплексом, автоматизированной транспортно-складской системой и т.д. Фактически на этом этапе решаются вопросы распределения задач управления между человеком, специализированными аппаратными средствами управления и управляющей ЭВМ, а также вопросы распределения задач по иерархическим уровням управления, т. е. вопросы «централизации — децентрализации» управления.

Методические подходы к решению этих вопросов различны. Однако часто в этих подходах не учитываются показатели качества СПО управления, что впоследствии отрицательно сказывается на эффективности функционирования всей системы управления ГАП. В связи с этим предлагается на этапе определения перечня типовых программных комплексов использовать имитационную модель оценки эффективности функционирования всей системы управления, охватывающей аппаратные, программные аспекты управления, а также взаимодействие с человеком, и при этом учесть в этой модели следующую систему показателей качества СПО управления:

- эффективность СПО, характеризующую вероятностью выполнения ГАП технологических операций и зависящую от показателей целевого применения ГАП (результативности, ресурсоемкости, оперативности);

- основные эксплуатационно-технические характеристики СПО (надежность, адаптивность);

- вспомогательные эксплуатационно-технические характеристики (контролируемость входной информации, автоматизируемость восстановления алгоритмов после сбоев, программная сложность, информационная сложность и т. д.);

- эксплуатационно-технические характеристики обслуживания СПО (обслуживание информационной базы и процесса целевого применения СПО);

- эксплуатационно-технические характеристики модификации СПО.

Следует особо подчеркнуть важность учета при универсализации СПО таких эксплуатационно-технических характеристик модификации СПО, как универсальность, обучаемость, модульность и мобильность.

Универсальность --- это степень приспособления СПО к проводимым в ГАП доработкам, а также к смене технологии в рамках выделенной группы технологий. *Обучаемость* --- это степень приспособления СПО к восприятию им новых, более углубленных знаний об автоматизируемых процессах управления. *Модульность* --- это степень приспособления СПО к включению в него новых или отключению из него старых задач управления ГАП путем использования модульной структуры построения СПО. *Мобильность* --- это степень приспособленности СПО к доработкам управляющей ЭВМ, включая изменения ее типа.

После определения состава типовых программных комплексов, исходя из общих требований, предъявляемых к системе управления ГАП в целом, формулируются частные требования к каждому ПК по перечисленной выше системе показателей качества. Затем, исходя из частных требований к каждому программному комплексу, выбирают метод универсализации этого комплекса, разрабатывают соответствующий этому методу алгоритм, представляют его на машинном языке управляющей ЭВМ, испытывают алгоритм и принимают в эксплуатацию.

Методические вопросы универсализации СПО целесообразно рассматривать отдельно для класса задач информационного обеспечения системы управления ГАП и класса задач выработки решений по управлению. В настоящее время универсализация задач информационного обеспечения системы управления ГАП в основном решена. Такое СПО выделилось в отдельный класс и называется *общее прикладное программное обеспечение* [3], вопросы же универсализации СПО выработки решения по управлению требуют еще своего решения как в плане теоретических аспектов, так и практических. Методической базой для решения этих вопросов должны быть результаты, полученные в работах по искусственному интеллекту.

Типовые задачи универсализации. Следуя наиболее распространенной в настоящее время технической структуре системы управления ГАП (рис. 6.7), процесс управления ГАП целесообразно разделить прежде всего на два связанных иерархически циклических подпроцесса: первый уровень --- локального управления; второй уровень --- централизованного управления. Третий уровень управления ГАП реализуется в центре управления (ЦУП) ГПС (рис. 6.8).

На каждом уровне процесс управления декомпозируется (подразделяется) на подпроцесс выработки решений (ВР) по управлению и подпроцесс информационного обеспечения (ИО) управления (рис. 6.9). При этом под выработкой решений по управлению производством понимается процесс подготовки возможных вариантов решений по управлению и выбор для реализации одного из этих вариантов (наиболее эффективного, целесообразного). В свою очередь, процесс выработки решений состоит из двух подпроцессов (рис. 6.10): планирования (П) и реализации плана (РП).



Рис. 6.7. Структура ГАП

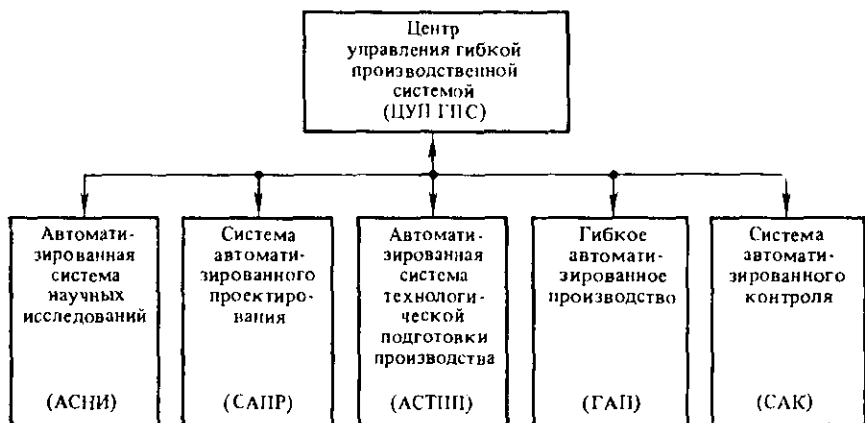


Рис. 6.8. Состав и взаимодействие ГПС

Процесс реализации плана (рис. 6.10) подразделяется на подпроцесс директивного управления производством (ДУ) и анализ состояния производства (А).

Процесс информационного обеспечения управления ГАП представляется совокупностью следующих основных подпроцессов: прием---передача информации, преобразование информации, учет и отображение информации.

Рассматривая подпроцессы планирования, отметим, что к высшему (третьему) уровню управления ГАП относится планирование, в результате которого формируется сменный план производства и управляющая программа организационных мероприятий, обеспечивающих выполнение сменного плана. Сменный план производства определяет требуемый объем выпускаемой продукции и материально-технического обеспечения ГАП. Он формируется в центре управления ГПС и является целью управления ГАП.

К среднему (второму) уровню управления ГАП относится планирование производства, в результате которого определяются план технологических маршрутов, представляемый график технологических операций, и управляющая программа реализации этого плана, т. е. управляющая программа централизованного управления компонентами первого уровня управления ГАП, — локальными системами управления: ГПМ, РТК, АТСС, АСУО, АСИО (см. рис. 6.7).

К низшему (первому) уровню управления ГАП относится планирование, выходным результатом которого является план технологических переходов и т.п., и управляющие программы локальных си-

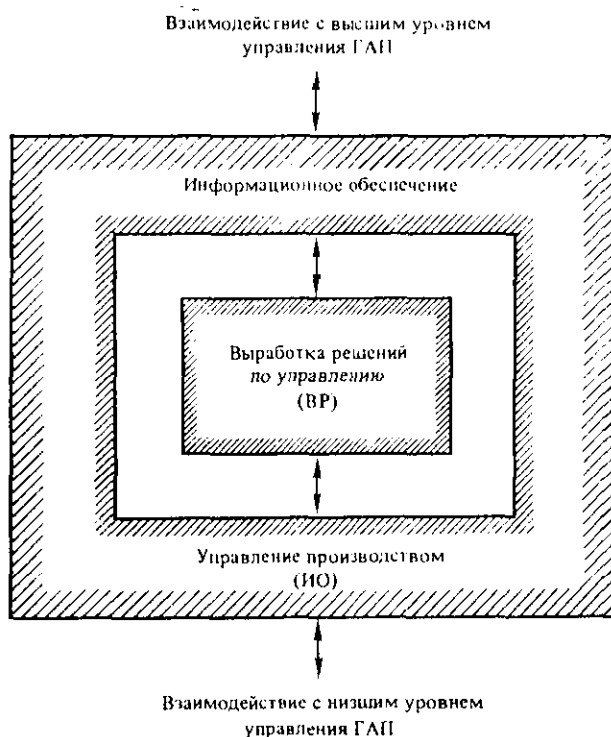


Рис. 6.9. Типовая декомпозиция процесса управления ГАП на одном иерархическом уровне

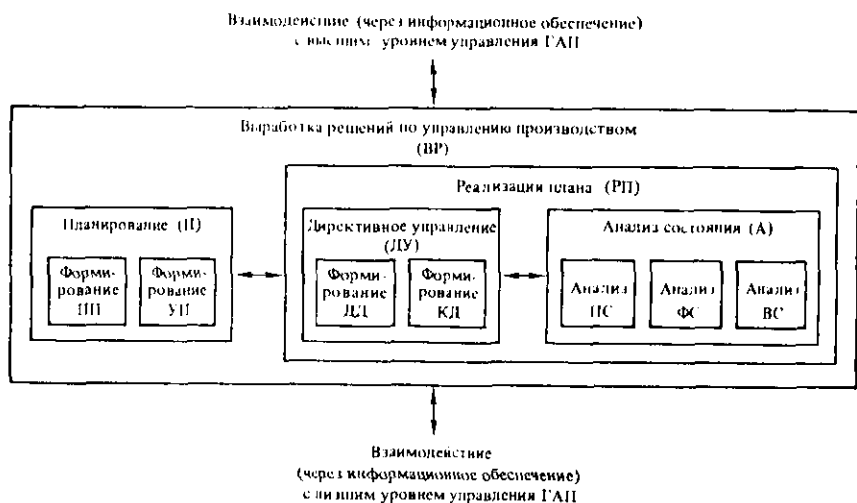


Рис. 6.10. Типовая декомпозиция процесса выработки решений по управлению ГАП на одном иерархическом уровне

стем управления. Таким образом, в общем случае процесс планирования производства на каждом уровне управления ГАП подразделяется всегда на два подпроцесса (рис. 6.10): на формирование плана производства (ПП) и на формирование управляющей программы производства (УП).

Планирование производства, проводимое применительно ко всем уровням управления, осуществляется таким образом, что его результаты (сменный план производства, план технологических маршрутов, план технологических операций и т.д.), а также соответствующие управляющие программы оказываются взаимоувязанными.

Основной целью анализа состояния производства является оценка соответствия фактического состояния ГАП планируемому его состоянию. При этом имеется в виду, что планируемое состояние определяется планом производства, а также регламентируется постоянными нормативными требованиями, предъявляемыми к ГАП и его компонентам на период выполнения ими тех или иных элементов технологического процесса (маршрутов, операций и т.д.).

Анализ состояния производства — это процесс, который, так же как и планирование, является разновидностью процесса выработки решений и носит диагностический характер. Решением, получаемым в результате анализа, система управления закрепляет в своей памяти представление о ГАП, из которого она будет исходить при планировании производства, а также управлении им.

Процесс анализа состояния ГАП декомпозируется на:

- анализ функционального состояния (функционирования) компонент ГАП (ФС);

--- анализ пространственного состояния (движения) компонент ГАП (ПС);

--- анализ состояния (функционального и пространственного) внешней среды, с которой взаимодействуют компоненты ГАП (ВС).

Функциональным состоянием компонент ГАП будем называть множество свойств компонент ГАП, характеризующих их способность выполнять свое функциональное назначение. К числу свойств (параметров), характеризующих функциональное состояние, относятся, например:

- параметры, свидетельствующие о включении в работу или отключении тех или иных элементов технологического оборудования, систем управления ГАП и т.д.;

- параметры состояния конструкции технологического оборудования, заготовок, инструмента, выпускаемой продукции;

- внутренние условия, в которых работает технологическое оборудование, система управления (температура, вибрация и т.д.);

- текущие ресурсы материально-технического обеспечения, а также внутренние ресурсы технологического оборудования, его системы управления и т. д.

Пространственным состоянием компонент ГАП будем называть множество таких свойств этих компонентов, которые характеризуют их положение в пространстве (текущие координаты, скорости, ориентация и т. п.).

Состояние внешней среды характеризуется:

- координатами, скоростью, ориентацией препятствий, находящихся в рабочих зонах ГПМ, РТК, АТСС, АСУО, АСИО;

- освещенностью, влажностью, температурой внешней среды, окружающей ППС, РТК, АТСС, АСИО, АСУО и т. п.

В качестве параметров, характеризующих косвенным образом состояние компонент ГАП, могут рассматриваться также результаты работы системы автоматизированного контроля (САК) готовой продукции, которые поступают в СУ ГАП при общей координации этого процесса центром управления ППС.

Целью директивного управления является выработка решений по выдаче директив управления на основе управляющей программы и результатов анализа состояния компонент ГАП.

Под *директивой управления* понимается управляющее воздействие, которое окончательно принято системой управления к реализации независимо от последующего состояния производства.

Директивы управления целесообразно подразделить на два основных типа: на командные директивы управления (КД) и на диспетчерские директивы управления (ДД).

Командные директивы управления представляют собой управляющие воздействия (команды), которые предназначены для исполнительных органов объектов управления каждого иерархического уровня управления.

Диспетчерские директивы управления представляют собой управляющие воздействия, предназначенные для координации подпроцессов управления в рамках одного иерархического уровня управления и взаимодействия с подпроцессами управления верхнего уровня.

В соответствии с этими двумя типами директив управления процесс директивного управления производством подразделяется на два подпроцесса (рис. 6.10): на формирование диспетчерских директив (ДД) и на формирование командных директив (КД).

Входной информацией процесса директивного управления на рассматриваемом иерархическом уровне управления являются:

- управляющая программа производством;
- результаты анализа состояния производства;
- командные директивы управления верхнего уровня.

Выходной информацией этого процесса являются командные и диспетчерские директивы.

На основе рассмотренных выше материалов процесс управления ГАП применительно к структуре, приведенной на рис. 6.7, целесообразно представить в виде трехуровневой типовой структуры (рис. 6.11). В соответствии с этой структурой взаимодействие информацией между иерархическими уровнями управления ГАП осуществляется через подпроцесс информационного обеспечения (ИО).

На каждом уровне управления ГАП, включая первый уровень (ПМ, РТК, АТСС, АСУО, АСИО), присутствует подпроцесс выработки решений (ВР) по управлению, который подразделяется на три основных циклических подпроцесса: планирование (П), директивное управление (ДУ), анализ (А). Подпроцесс директивного управления ГАП второго уровня является управляющим по отношению к каждому подпроцессу первого уровня.

Подпроцессы планирования и директивного управления второго, первого уровней управления ГАП (сверху вниз по иерархии) образуют прямой канал управления ГАП, по которому передаются планы, управляющие программы, директивы управления. В прямом канале управления при переходе от верхнего уровня к нижнему производится разукрупнение (деагрегирование) управляющей информации (маршруты, операции, переходы и т.д.). Процессы верхнего уровня управления более медленные, следовательно, период выработки решений для процессов верхнего уровня больше, чем для процессов нижнего уровня.

Подпроцессы анализа первого и второго уровней (снизу вверх) образуют обратный канал управления производством, по которому поступает информация о выполнении плана, состоянии технологического оборудования и системы управления, состоянии инструмента, качестве продукции и т.д. В обратном канале управления при продвижении по иерархии снизу вверх проводится укрупнение (агрегирование) производственной информации.

Координирование уровней управления ГАП осуществляется как сверху вниз, так и снизу вверх подпроцессом директивного управле-

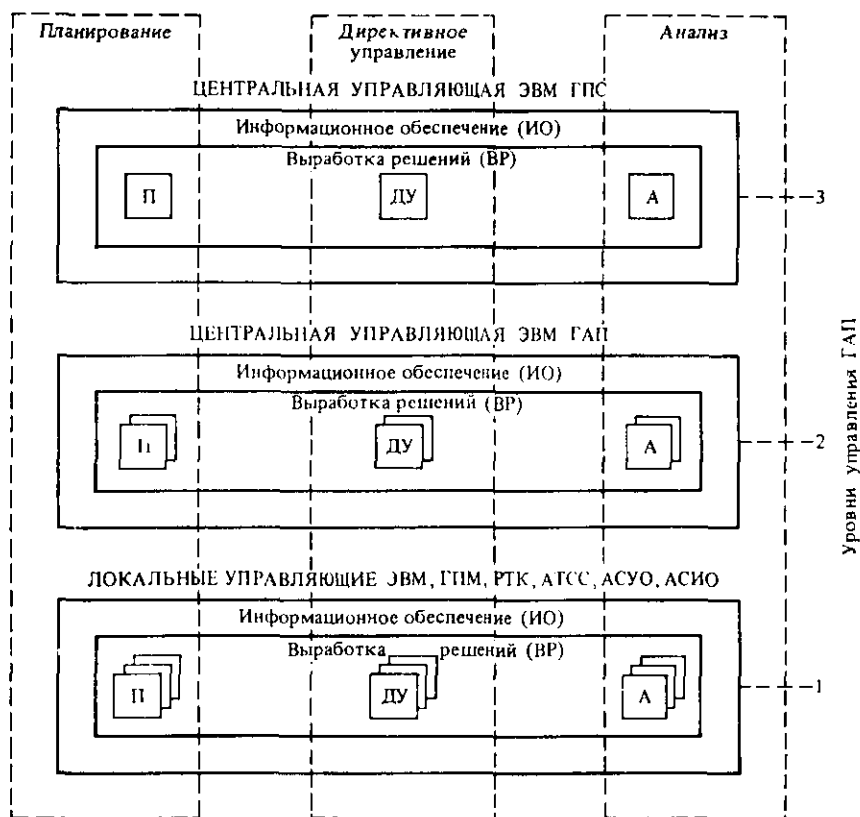


Рис. 6.11. Типовая декомпозиция многоуровневого процесса управления ГАП

ния. Передача управления сверху вниз характерна для случаев, когда отсутствуют отклонения от запланированного течения процесса управления. При наличии такого отклонения управление может передаваться с нижнего уровня на следующий верхний уровень, когда на нижнем уровне не хватает имеющихся ресурсов или полномочий для ликвидации отклонений, т. е. нижний уровень не в состоянии выполнить поставленную верхним уровнем цель управления производством.

Представленная на рис. 6.11 и описанная выше типовая декомпозиция процесса управления ГАП соответствует общим принципам описания процессов программно-целевого планирования и управления а также в общей теории построения иерархических многоуровневых систем управления.

Новизна предложенной типовой декомпозиции процесса управления состоит в том, что в ней выделяется интегрированный по всем уровням управления класс типовых задач выработки решений по управле-

нию: планирование, директивное управление, анализ. Фактически такая типизация создает предпосылки для создания семейства типовых программных комплексов планирования, директивного управления и анализа, из которых можно компоновать реализуемый в ЭВМ процесс управления на любом иерархическом уровне в рамках одного конкретного ГАП, и для любого элемента ГАП: центральной управляющей ЭВМ, локальных управляющих ЭВМ (ГПМ, РТК, АТСС, АСУО, АСИО).

Если при практической реализации процесса управления отработанные типовые ПК на одном уровне управления, например на первом, в составе РТК начинают использоваться в центральной управляющей ЭВМ или наоборот, то такой процесс будем называть *универсализацией СПО управления ГАП по вертикали*. Если же типовые ПК, отработанные на одном уровне управления в составе управляющей ЭВМ, например РТК, начинают использовать в управляющей ЭВМ другого элемента этого уровня, например АТСС, или наоборот, то такой процесс будем называть *универсализацией СПО управления ГАП по горизонтали*.

Как указывалось выше, чтобы определить на базе типовой структуры процесса управления перечень типовых программных комплексов СПО управляющих ЭВМ ГАП, необходимо решить вопросы распределения задач этой типовой структуры между человеком, специализированными аппаратными средствами управления, центральной управляющей ЭВМ и локальными управляющими ЭВМ (ГПМ, РТК, АТСС, АСУО, АСИО). Решение этих задач зависит от множества факторов, оцениваемых на этапе проектирования системы управления и ГАП в целом. В связи с этим целесообразно определить базовый состав типовых ПК, соответствующий максимальному уровню программной автоматизации типовых задач управления ГАП. Такой перечень типовых ПК представлен на рис. 6.12. Сопоставление этого перечня ПК с составом программных комплексов отечественных и зарубежных СУ ГАП показал, что в целом он им не противоречит, но является более общим и укрупненным. В то же время этот анализ показал, что в современных системах управления ГАП нет четко выраженной типовой структуры СПО управляющих ЭВМ, разработанной на базе интеллектуальных элементов управления. При этом эволюция СПО происходит специализированно в рамках проектов только своих предприятий (фирм), как правило, организационно никем не координируется. Все это не способствует процессу универсализации СПО и в целом процессу обеспечения гибкости систем управления ГАП.

Выше были рассмотрены основные задачи управления ГАП и их взаимодействие на всех уровнях типовой иерархической структуры управления ГАП. При этом не акцентировался вопрос: для какого типа автоматического управления (программного, адаптивного, интеллектуального) справедлива эта типовая структура управления и каким образом вписываются в нее задачи управления в зависимости от типа управления. Это связано с тем, что приводимые в настоящее время опре-

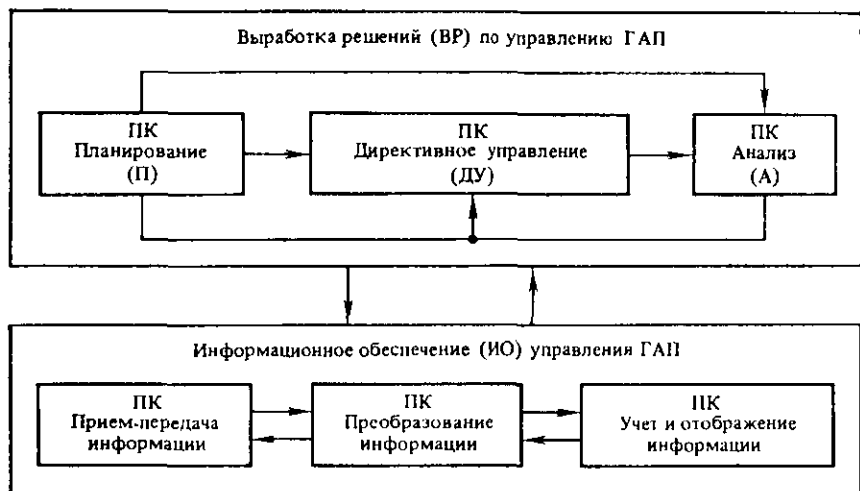


Рис. 6.12. Базовый состав типовых ПК одного иерархического уровня управления ГАП

деления систем программного, адаптивного и интеллектуального управления являются, как правило, весьма расплывчатыми и недостаточными, чтобы на их основе можно было давать конкретные рекомендации по постановкам задач управления и их типовым структурам дифференцированно к каждому из этих типов управления. Более конкретные определения программного, адаптивного и интеллектуального управления можно дать на основе уровней сложности (слоев) процесса выработки решений по управлению который, как было указано выше, является определяющим процессом при проектировании в целом всей системы управления ГАП.

В соответствии с этой идеологией *интеллектуальное управление ГАП* это управление, задачей которого является определение множества неопределенностей и стратегий обучения поведения ГАП в этом множестве с целью выполнения заданной технологической операции (рис. 6.13). При этом задачей адаптивного управления будет сужение в соответствии со стратегией обучения неопределенности вплоть до ее устранения и получения множества альтернативных действий, обеспечивающих выполнение заданной технологической операции. Тогда программное управление представляют как процесс выбора конкретного действия из множества альтернативных действий, обеспечивающих выполнение заданной технологической операции ГАП. Процесс такого выбора основывается на оптимизации, т. е. на нахождении такого конкретного действия, которое удовлетворяло бы определенному условию выполнения технологической операции ГАП, например по качеству продукции или ее наименьшей стоимости и т.д.

В современных ГАП из этих трех слоев сложности выработки решений по управлению фактически реализуется только низший слой выбора, т. е. реализуется программное управление. Остальные слои ГАП (обучение с адаптацией и самоорганизация) реализуются на средствах автоматизированной системы технологической подготовки производства с участием человека-оператора, т. е. не в процессе работы оборудования ГАП по выполнению заданной технологической операции, а в процессе его подготовки к этой работе. Из рассмотренного выше следует, что для того, чтобы создать адаптивную систему управления ГАП, необходимо в реальный контур управления ГАП из АСТПП перенести и реализовать в автоматическом режиме, т. е. без

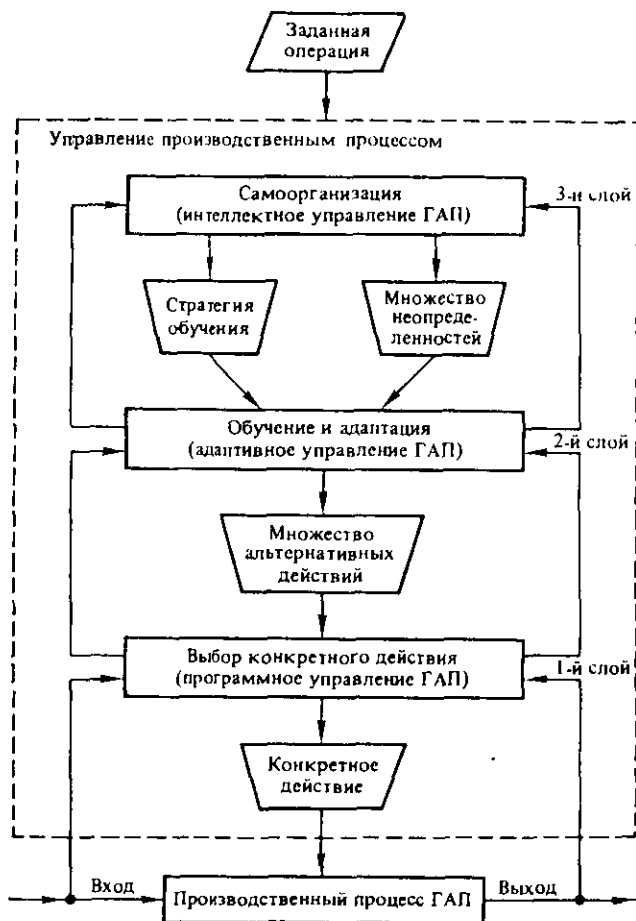


Рис. 6.13. Иерархия слоев выработки решений по управлению ГАП

участия человека, средний слой выработки решений по управлению ГАП (обучение и адаптацию). Аналогичным образом, для создания интеллектуальной системы управления ГАП необходимо из АСТПП в ГАП дополнительно к слою обучения и адаптации перенести и реализовать в автоматическом режиме верхний слой выработки решений — самоорганизацию. При этом в одном и другом случае все элементы функционирующей подсистемы программного управления ГАП остаются неизменными, к ним только добавляется в первом случае подсистема обучения и адаптации, а во втором случае к подсистеме обучения и адаптации добавляется подсистема самоорганизации.

При наличии в контуре управления ГАП всех трех подсистем выработки решений (программной, адаптивной и интеллектуальной) процесс управления в так называемых штатных (т.е. обученных, расчетных, предусмотренных) ситуациях управления будет всегда осуществляться подсистемой программного управления. И только при возникновении нештатных ситуаций включается в работу подсистема обучения и адаптации, которая должна попытаться имеющимися у нее средствами свести управление к штатным ситуациям. Если же и она не сможет этого сделать, то тогда включается система самоорганизации, которая определит множество неопределенностей в управлении, выдаст адаптивной подсистеме определенную стратегию обучения и поставит ее в исследовательский (познавательный) режим. Результатом работы адаптивной подсистемы в этом исследовательском режиме является формирование множества альтернативных действий, позволяющих в дальнейшем подсистеме программного управления войти в штатный режим управления ГАП.

Из приведенных в данном разделе определений следует, что для адаптивного и интеллектуального управления ГАП необходимым условием является наличие в системе выработки решений по управлению ГАП подсистемы анализа производства и подсистемы планирования поведения ГАП. Однако это условие является необходимым, но не достаточным для того, чтобы систему управления, у которой есть подсистема анализа и планирования, считать адаптивной или интеллектуальной. Имея эти подсистемы, система управления ГАП может быть и программной, т. е. работать на уровне слоя выбора конкретного действия. Все будет зависеть от того, на каком слое выработки решений эти подсистемы (планирования и анализа) могут функционировать в автоматическом режиме управления ГАП.

Универсализация на основе концептуальных моделей. Одним из эффективных направлений искусственного интеллекта, которое можно применить для универсализации СПО выработки решений по управлению ГАП, является направление семиотического моделирования. Практические работы этого направления в настоящее время сводятся в основном к созданию языков представления знаний, используемых для описания автоматизируемых процессов управления. Однако использование языков представления знаний следует в конечном счете рассматривать как некоторую эффективную общепрограммную под-

держку создания прикладных программных комплексов, а не как основное решение вопросов их универсализации. Это объясняется тем, что хотя указанные языки и называются языками представления знаний, но фактически они относятся к классу универсальных языков программирования, отвечающих на вопрос: «Как запрограммировать уже имеющуюся семиотическую модель управления». В то же время эти языки не отвечают на центральный вопрос автоматизации: «Что должна представлять собой эта модель?», а этот вопрос по сравнению с языками представления знаний еще очень слабо разработан даже в теоретическом плане.

Одним из возможных путей решения этого вопроса является разработка для каждой задачи типовой структуры управления проблемно-ориентированной концептуальной кибернетической модели, фиксирующей: основные классы понятий, используемых при описании процессов управления; структуры понятий, основные классы зависимостей (отношений) между ними, а также присоединенные к основным понятиям процедуры присвоения различных значений этим понятиям, реализующие в конечном счете процесс вычислений в модели. В зависимости от имеющихся в наличии средств общепрограммной поддержки такая концептуальная проблемно-ориентированная модель может быть запрограммирована на любом языке программирования, включая языки представления знаний.

Концептуальная проблемно-ориентированная модель представляется совокупностью абстрактной модели предметной области автоматизируемого процесса управления (АМПУ) и ориентированного для работы только с этой моделью предметной области универсального механизма вывода решений по управлению (УМВР). При этом под универсальностью механизма вывода решений понимается способность получить результат, т. е. решение по управлению, при любой конкретизации абстрактной модели предметной области.

Конкретизация абстрактной модели предметной области производится путем ввода в нее конкретных описаний понятий на специальном табличном языке. Будем этот язык в дальнейшем называть языком конкретизации модели предметной области (ЯКМ) или, что одно и то же, — языком конкретизации проблемно-ориентированной концептуальной модели автоматизируемого процесса управления (см. ниже рис. 6.17 — 6.22 и табл. 6.3 — 6.10). При этом следует особо подчеркнуть, что языком конкретизации модели реализуется не концептуальная модель процесса управления, а только специфика ее, при учете того, что сама концептуальная модель, т. е. механизм вывода решений и абстрактная модель предметной области, уже предоставлена в ЭВМ.

В дальнейшем концептуальную проблемно-ориентированную модель автоматизированного процесса выработки решений по управлению ГАП, представленную на одном из языков программирования, будем называть типовым программным комплексом выработки решений по управлению. Универсальный механизм вывода решений этого програм-

много комплекса следует называть универсальным программным ядром реального масштаба времени (УПЯ РМВ), подчеркивая этим, что данное программное ядро работает в реальном масштабе времени управления ГАП; массив данных, представляемых на языке конкретизации модели, -- называть технологическими исходными данными типового программного комплекса, а процесс подготовки технологических данных, ввода их в ЭВМ и коррекции -- называть технологическим программированием системы управления ГАП.

Представление технологических исходных данных на ЯКМ ориентировано на специалиста-потребителя, т. е. на технолога.

Для того чтобы программы типового ПК могли с этими данными работать, необходимо, чтобы в ЭВМ они были представлены в той структуре, на которую ориентированы взаимодействующие с ними программы типового ПК. Такое представление технологических исходных данных (ТИД) будем называть *оперативной базой ТИД* (ОБ ТИД). В целях формирования ОБ ТИД разрабатываются специальные программные средства. Основными функциями этих средств являются трансляция технологических исходных данных, представленных на ЯКМ в структуры ОБ ТИД и коррекция ТИД. Программные средства формирования ТИД на ЯКМ, коррекции ТИД и трансляции их в структуры ОБ ТИД объединяются в информационно-интерпретирующую систему (ИИС), функционирование которой не привязано жестко к технологическому циклу управления ГАП. В принципе ИИС может быть реализована как в центральной управляющей ЭВМ ГАП, так в ЭВМ автоматизированной системы технологической подготовки производства.

Для более глубокого уяснения приведенных выше понятий (универсального механизма вывода решений, абстрактной модели предметной области, языка конкретизации модели, оперативной базы технологических исходных данных и информационно-интерпретирующей системы) рассмотрим пример анализа функционального состояния элемента ГАП (станка, робота) с использованием матричного метода (таблиц решений). При этом подходе в качестве модели предметной области элемента ГАП следует рассматривать модель функционирования этого элемента, представленную в значениях измеряемых параметров обратной связи.

Абстрактное представление такой модели на содержательном уровне имеет вид «пустой» матрицы (табл. 6.1), т. е. матрицы, у которой элементы не заполнены конкретными значениями измеряемых параметров и номерами ситуации (s_i) функционирования рассматриваемого элемента ГАП (станка, робота). Конкретизированное представление модели предметной области имеет вид «заполненной» матрицы (табл. 6.2). Здесь заполненная матрица представлена в таком виде, в котором она подготавливается потребителем-технологом на языке конкретизации модели (ЯКМ) в составе технологических исходных данных (ТИД). С помощью ИИС эта матрица вводится в ЭВМ и транслируется в машинную структуру, т. е. превращается в оперативную ба-

Таблица 6.1. Абстрактное представление модели

Измерительные параметры, характеризующие функционирование станка с ЧПУ				Номера ситуаций функционирования станка с ЧПУ
X_1	X_2	X_3	X_4	S_i

Таблица 6.2. Конкретизированное представление модели

Измерительные параметры, характеризующие функционирование станка с ЧПУ				Номера ситуаций функционирования станка с ЧПУ
X_1	X_2	X_3	X_4	S_i
1	1	0	1	S_5
0	0	1	1	S_7
1	0	1	1	S_2

зу технологических исходных данных (ОБ ТИД). С помощью специальных средств ИИС представляется возможность достаточно оперативно провести при необходимости коррекцию ОБ ТИД, т. е. провести «вставку», «замену», «удаление» любого элемента матрицы, представленной уже в виде ОБ ТИД.

Универсальный механизм вывода решений в рассматриваемом случае использования матричного подхода к разработке типового ПК анализа представляет собой программу, которая выполняет следующие функции:

- формирование всей совокупности значений измеряемых параметров на фиксируемый момент времени;
- выбор значений тех измеряемых параметров, которые указаны в матрице;
- формирование информационного слова (текущей вектор-строки) по анализируемому элементу ГАП;
- идентификация информационного слова с помощью матрицы, т. е. нахождение той строки матрицы, с кодом которой совпадает код текущей вектор-строки, и определение таким образом номера ситуации функционирования элемента ГАП;
- выдача результатов анализа на средства наглядного отображения, документирования и засылка их в архив управляющей ЭВМ.

Следует отметить, что рассмотренный пример использования матричной модели в практике автоматизации задач анализа функционального состояния элементов автоматизированных систем управления характерен только для «статических» режимов их функционирования. Для «динамических» режимов необходимо использовать более сложные модели, например (см. ниже) модель, базовыми понятиями которой являются: ситуация, событие (точечное, интервальное, комбинированное), параметр, результат анализа. Отношения, связывающие эти базовые понятия анализа, описываются процедурами исчисления высказываний и псевдофизической временной логики. Структура такой модели анализа представляется сетью фреймов, процедурная часть которых составляет универсальный решатель, работающий в реальном масштабе времени управления, а декларативная часть — абстрактную модель предметной области анализа.

В качестве иллюстрации взаимодействия приведенных выше понятий (ЯКМ, ОБ ТИД, ИИС и т.д.) между собой и отношения их к реальному технологическому циклу управления ГАП на рис. 6.14 приведена упрощенная схема этапности создания типового ПК на языке программирования ПЛИ. При этом универсальный механизм вывода решений рассматривается как процедурная часть типового ПК, а конкретизированная абстрактная модель предметной области в качестве декларативной части.

В том случае, когда ЯКМ не обеспечивает описание в декларативном виде некоторых «специфических» свойств конкретной технологии ГАП, эти свойства необходимо представить в процедурном виде, т.е. разработать специальную дополнительную программу и включить ее в состав типового ПК на правах специализированного элемента. Для этого должны быть предусмотрены соответствующие программные средства, позволяющие эффективно включить в ПК новую программу. Специализированные элементы ПК можно рассматривать в качестве стандартных подпрограмм, определенным образом оформляемых и представляемых для пополнения типового ПК. Такими стандартными подпрограммами могут быть, например, специализированные элементы расчета некоторых косвенных параметров ГАП, проводимого по аналитическим формулам (расходы энергоресурса и материалов, учет готовой продукции и т.п.), а также специализированные элементы определения более сложных свойств ГАП, например статистических характеристик и т. д.

Если какие-то специализированные элементы начинают появляться достаточно часто, то применительно к ним необходимо доработать абстрактную модель, язык конкретизации модели и универсальный механизм вывода решений.

В заключение следует подчеркнуть, что рассмотренные выше принципы универсализации СПУ управления ГАП, основанные на разработке проблемно-ориентированной концептуальной модели, отличаются от классических методов искусственного интеллекта прежде всего своей практической направленностью. И это в первую очередь обу-

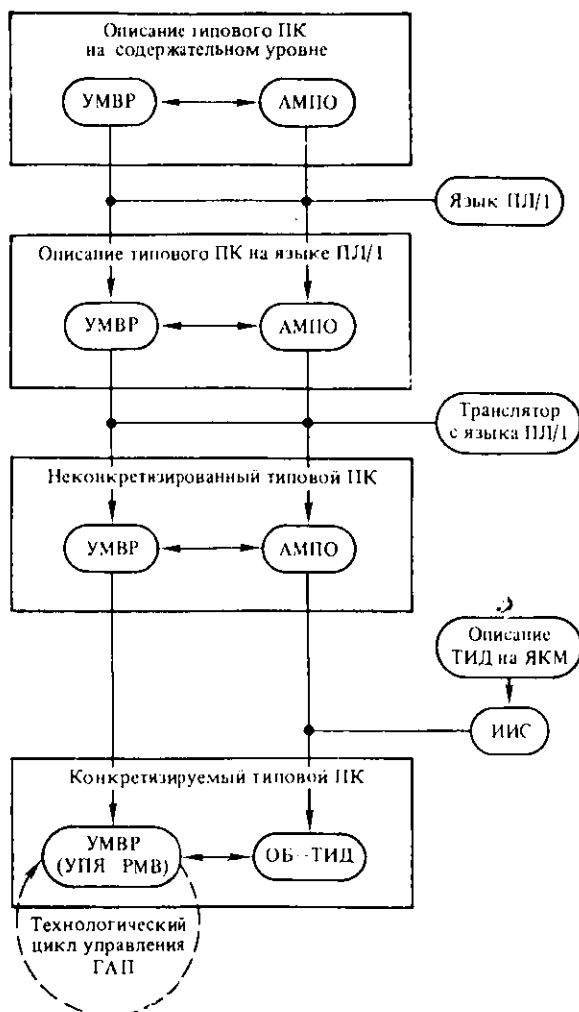


Рис. 6.14. Схема этапности создания типового ПК на языке программирования ПЛ/1

словлено тем, что они не предусматривают создание одного универсального решателя для всех задач типовой структуры управления ГАП, а предполагают разработку семейства универсальных решателей для трех классов задач: планирования, директивного управления, анализа. При этом имеется в виду, что каждый из этих универсальных решателей будет функционировать в изученной и строго оговоренной проблемной среде (например, среде планирования технологических процессов, планирования инструмента, заготовок и т.п.), а не в любой среде ГАП.

тем более неопределенной (или частично неопределенной). И наконец, отход от языков представления знаний как единственно эффективного средства универсализации специального программного обеспечения управления и ориентация на язык конкретизации проблемно-ориентированной концептуальной модели, естественно, намного отдаляет рассмотренную выше идеологию универсализации от передовых взглядов на эту проблему специалистов по искусственному интеллекту. Зато отдаляясь от этих взглядов, большей частью теоретических, сторонники данной идеологии становятся гораздо ближе к возможности решения проблемы универсализации СПО на современных вычислительных средствах ГАП, в том числе и отечественных. При этом следует сказать также, что реализуемый в настоящее время в системах управления ГАП фирмы «Болш» ФРГ аппаратный принцип модульного наращивания интеллекта в общих чертах не противоречит рассмотренной идеологии программной универсализации системы управления ГАП.

Технологические исходные данные для типовых программных комплексов выработки решений по управлению ГАП подготавливаются в два этапа. Первый этап реализуется в период подготовки ГАП к работе. Он предусматривает изучение эксплуатационно-технической документации по управлению ГАП и разработку на основе этой документации всех конкретных описаний элементов модели предметной области. Второй этап реализуется в процессе работы ГАП, т. е. выполнения заданных технологических операций и предполагает, с одной стороны, проверку в реальных условиях управления ГАП правильности конкретных описаний (знаний) элементов предметной области, введенной в ЭВМ до работы ГАП, и, с другой стороны --- получение в процессе управления новых знаний об элементах предметной области автоматизируемого процесса управления ГАП.

Процесс, реализуемый на первом этапе, будем называть *априорным режимом обучения типового программного комплекса*, а процесс, реализуемый на втором этапе, *апостериорным режимом обучения*. Апостериорное обучение типового программного комплекса целесообразно подразделять на два типа: неавтоматизированное (ручное) и автоматизированное. Под неавтоматизированным обучением типового ПК будем понимать процесс подготовки технологических исходных данных, при котором специалист по управлению с помощью языка конкретизации модели и информационно-интерпретирующей системы заносит в память ЭВМ уже готовые конкретные элементы модели предметной области, полученные вне ЭВМ. При автоматизированном обучении типового ПК некоторые процессы определения элементов модели предметной области реализуются с помощью специально разработанных и встроенных в ИИС программ обучения. Пределом автоматизации обучения типового ПК является автоматический режим, при котором человек-оператор (учитель) отсутствует.

Процесс апостериорного обучения типового ПК проиллюстрирован на рис. 6.15, где функции учителя выполняет человек --- специа-

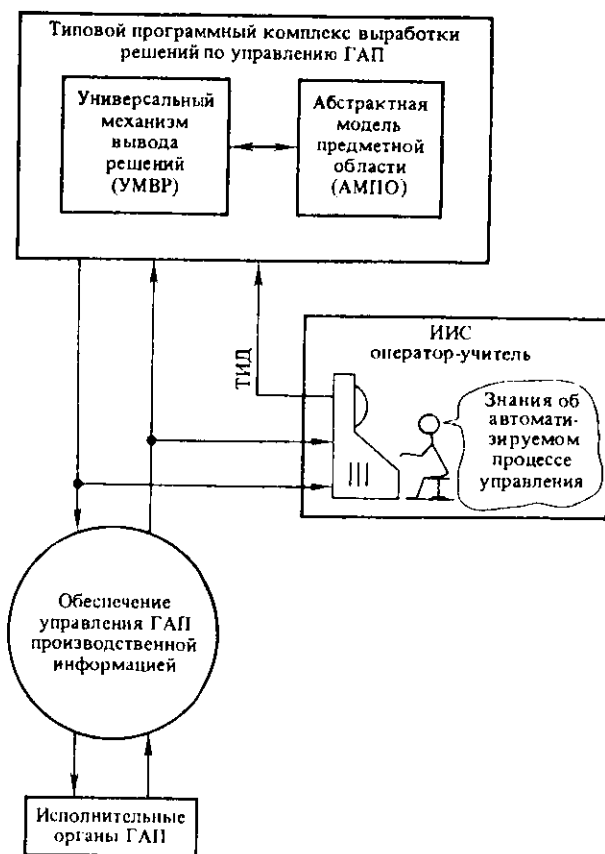


Рис. 6.15. Апостериорное обучение типового ГЭК

лист группы управления. При этом человек проводит анализ информации прямого и обратного каналов управления, поступающей на средства отображения информационно-интерпретирующей системы. Данные по конкретизации элементов модели предметной области человек вводит в ЭВМ на ЯКМ, используя при этом соответствующие средства ИИС.

Рассмотрим подробнее процесс апостериорного обучения. Из рассмотренных выше определений программной, адаптивной и интеллектуальной системы управления ГАП следует, что процесс выработки решений по управлению ГАП можно подразделить на два взаимосвязанных подпроцесса: выработку решений по управлению в расчетных (штатных) ситуациях управления — ВРУП (РС) и выработку решений по управлению в нерасчетных (нештатных) ситуациях управления — ВРУП (НРС). Взаимодействие этих подпроцессов проиллюстрировано

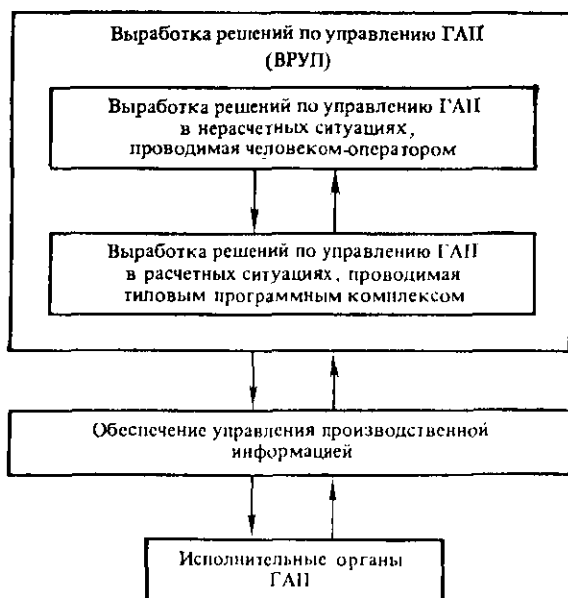


Рис. 6.16. Взаимодействие подпроцессов выработки решений по управлению ГАП в расчетных и нерасчетных ситуациях

на рис. 6.16, откуда следует, что в случае если в процессе работы ГАП ситуация управления оказывается расчетной, то реализуется только подпроцесс ВРУП (РС). Если же ситуация оказывается нерасчетной, то реализуется подпроцесс ВРУП (НРС), в результате чего отыскивается требуемое решение и осуществляется перевод нерасчетной ситуации управления в расчетную с передачей информации об этой ситуации в подпроцесс ВРУП (РС). Рассмотрим теперь содержание и взаимодействие этих подпроцессов с позиций рассмотренных выше принципов создания типовых программных комплексов выработки решений по управлению ГАП.

Процесс выработки решений в расчетных ситуациях характеризуется такими элементами модели предметной области, которые позволяют найти требуемое решение по управлению. Процесс выработки решений в нерасчетных ситуациях характерен тем, что один из элементов модели предметной области или все вместе взятые или какая-то их комбинация не соответствуют сложившейся реальной ситуации управления и поэтому типовой ПК не имеет возможности изменить или дополнить элементы модели предметной области до тех пор, пока требуемое решение будет найдено. В этом случае необходимо изменять или дополнять элементы модели предметной области до тех пор, пока требуемое решение будет найдено. Измененные, дополненные элементы модели предметной области, при которых требуемое решение будет найдено, должны быть запомнены в модели, с тем чтобы в последующем при воз-

никновении аналогичной ситуации управления ими можно было воспользоваться. Этим самым возникающая впервые нерасчетная ситуация во второй раз и последующие становится расчетной. Изменение и дополнение элементов модели предметной области на первых этапах автоматизации является функцией человека-оператора, т. е. учителя, который является «механизмом», осуществляющим перевод нерасчетных ситуаций в расчетные. Отсюда следует, что апостериорный процесс обучения типового ПК может протекать двояким образом.

В первом случае оперативная база технологических исходных данных представляет собой массив информации, полученный еще до работы ГАП в режиме апостериорного обучения типового ПК. Здесь в процессе работы ГАП осуществляется как бы дообучение типового ПК тем ситуациям управления, которые не были предусмотрены (расчитаны) в режиме априорного обучения.

Во втором случае оперативная база технологических исходных данных представляет собой пустое множество. В этом случае в процессе работы ГАП осуществляется обучение типового ПК всем ситуациям управления, которые реально возникают в процессе работы ГАП, но при этом в оперативной базе ТИД будут отсутствовать возможные ситуации управления, которые «конструирует» (рассчитывает) человек-оператор, готовясь к работе в нештатных ситуациях управления ГАП.

В связи с этим целесообразно комбинированное использование априорного и апостериорного видов обучения типового ПК, а именно: технологические исходные данные для нештатного управления ГАП нужно готовить в априорном режиме обучения, а для штатного управления целесообразно выделить в начале работы ГАП определенный интервал времени, в процессе которого, привлекая специалистов группы управления, можно получить практически все технологические исходные данные, характеризующие штатный процесс управления. Преимущество последнего режима состоит в том, что все полученные при этом технологические исходные данные не требуют проверки на достоверность.

Наличие возможности оперативной коррекции технологических исходных данных открывает широкие возможности в преодолении психологического барьера недоверия операторов группы управления ГАП, руководителей цехов, участков и т.д. к автоматизации проводимой на базе использования СПО управляющих ЭВМ. Недоверие к автоматизации, т. е. к результатам работы СПО, вызывается самой областью, в которую «вторгается» специальное программное обеспечение. Это область высшей творческой деятельности специалиста по управлению ГАП. Особенно это недоверие усугубляется тогда, когда сам механизм переработки информации специальным программным обеспечением управления остается «скрытым» от специалиста по управлению. Поэтому наиболее эффективным способом преодоления барьера недоверия является такая организация работы, когда у специалиста по управлению ГАП создается впечатление, что он сам «конструирует» алгоритм этого СПО.

При реализации специализированного подхода к созданию СПО привлечь специалиста по управлению к «конструированию» алгоритмов СПО возможно только на этапах разработки СПО и весьма затруднительно, а фактически полностью неосуществимо, на этапе эксплуатации СПО.

В то же время создание типового СПО открывает широкие возможности в этом направлении. Дело в том, что технологические исходные данные типовых программных комплексов могут рассматриваться специалистами по управлению ГАП как алгоритмы автоматизированного решения задач управления. И это соответствует действительности, если использовать для реализации таких алгоритмов в ЭВМ специализированное СПО. Общий механизм вывода решений универсальным программным ядром РМВ при использовании типового СПО оказывается, как правило, скрытым от специалиста по управлению и нет особой необходимости ему объяснять этот механизм, так как смысловое содержание принимаемых решений по управлению всегда определяется содержанием технологических исходных данных. Это приводит к тому, что на этапе эксплуатации СПО, изменяя полностью или корректируя частично технологические исходные данные в соответствии с желанием специалиста по управлению, можно в его присутствии в течение 30–40 мин реализовать в ЭВМ любой «сконструированный» им алгоритм и сразу же получить результат его работы по реальной производственной информации, записанной в архиве информационной системы.

Таким образом, использование типового СПО, как уже неоднократно упоминалось выше, приближает потребителя, т. е. специалиста по управлению, к ЭВМ. Фактически в этом случае типовое СПО превращается в универсальный инструмент автоматизации, с помощью которого специалист по управлению — не программист — достаточно оперативно может автоматизировать часть своей мыслительной деятельности для ряда стереотипных ситуаций управления ГАП.

Пример построения концептуальной модели. Идеология программной универсализации управления функционирования ГАП на основе проблемно-ориентированной концептуальной модели в отличие от аппаратной универсализации только формируется и в практике автоматизации процессов управления ГАП еще широко не используется. Поэтому ниже будет рассмотрен только один из возможных вариантов конкретной реализации такой идеологии и только применительно к задаче анализа функционального состояния оборудования ГАП, которая относится к классу типовых задач анализа состояния производства.

Основой универсализации на базе проблемно-ориентированной концептуальной модели являются базовые понятия этой модели. В рассматриваемом варианте концептуальной модели к базовым понятиям относятся:

- ситуация функционирования оборудования ГАП;
- событие функционирования оборудования ГАП;
- параметр функционирования оборудования ГАП;

результат оперативного анализа функционирования оборудования ГАП.

Ситуация функционирования (s) характеризует функционирование оборудования в текущий момент времени выполнения технологической операции с учетом или без учета предыстории функционирования ГАП*. В зависимости от способа использования понятие ситуации приобретает характерный оттенок, поэтому введем следующие типы этого понятия.

Ситуацией функционирования любого элемента оборудования ГАП (блока, системы и т. д.) называется ситуация, характеризующая функционирование этого элемента с учетом управляющих воздействий, поступающих на его вход. При этом образуется иерархическая система ситуаций функционирования, в которой ситуации функционирования оборудования в целом (S_n) задаются через ситуации функционирования систем (S_c), а ситуации функционирования систем — ситуациями функционирования блоков S_b и т. д., формируемыми на основе наблюдаемых параметров обратной связи и управляющих воздействий. Каждому режиму оборудования ГАП соответствует некоторое множество ситуаций функционирования, которые называются ситуациями, отнесенными к этому режиму, или сокращенно — *ситуациями режимов оборудования ГАП*.

Ситуацией прохождения команды (S_n) будем называть ситуацию, характеризующую процесс штатного прохождения команды в автоматiku оборудования ГАП. В зависимости от уровня обобщения команды эта ситуация формируется либо на базе наблюдаемых параметров, либо на базе ситуаций функционирования систем, блоков и т. д.

Ситуации функционирования, определяющие наступление необходимых условий для выдачи команд, будем называть *ситуациями выдачи команд* (S_n).

Ситуации функционирования оборудования ГАП, определяющие текущий режим функционирования этого оборудования, будем называть *ситуациями распознавания текущих режимов оборудования* (S_n).

Все ситуации функционирования ГАП подразделяются на следующие четыре класса: штатные, нештатные, запрещенные и вспомогательные.

Штатные ситуации (Ш) характеризуют штатное (нормальное) функционирование оборудования.

Нештатные ситуации (НШ) характеризуют нештатное (аномальное) функционирование оборудования.

Запрещающие ситуации (З) характеризуют такое функционирование, при котором запрещается использовать (включать в работу) соответствующий режим функционирования оборудования.

* Здесь и ниже при описании примера введение в аббревиатуры базовых понятий русских и латинских букв определено удобством использования этих понятий при описании и вводе в ЭВМ соответствующих текстов на языке конкретизации модели.

Вспомогательные ситуации (В) – это все остальные ситуации, которые не вошли в класс штатных, нештатных и запрещающих ситуаций. В частности, в класс вспомогательных ситуаций входят указанные выше ситуации прохождения команд, выдачи команд, распознавания текущего режима оборудования ГАИ.

Описанием ситуации функционирования оборудования называется формальное представление ситуации в виде совокупности следующих элементов описания: имя ситуации, класс ситуации, тип ситуации, логическая функция ситуации.

Логическая функция ситуации функционирования оборудования представляет собой предикат, описываемый в виде логической формулы, связывающей множество предметных переменных грамматическими связками НЕ, И, ИЛИ, СКОБКА, ЗАПЯТАЯ, задающий отношение «Быть в наличии в текущий момент времени функционирования».

Сигналом появления ситуации называется сигнал, формируемый в момент, когда логическая функция в реальных условиях функционирования оборудования принимает значение «истинно». Сигналы ситуации могут быть мгновенными и непрерывными. Наличие сигнала появления ситуации ставится в соответствие число натурального ряда 1, а отсутствию – число натурального ряда 2. Оба этих числа (1,2) называются *состоянием понятия ситуации функционирования оборудования (CS)*.

Предметной переменной ситуации функционирования оборудования называется предметная переменная его логической функции. Значение предметной переменной ситуации функционирования называется *аргументом ситуации*. Предметными переменными ситуации функционирования могут быть параметры функционирования, события функционирования (точечные, интервальные, комбинированные) и сами ситуации функционирования.

Аргументами ситуации функционирования могут быть состояния параметров функционирования, событий функционирования (CZ) и ситуаций функционирования (CS).

Ситуацию функционирования, которая является предметной переменной другой ситуации функционирования, будем называть *промежуточной ситуацией (S')*. Ситуацию функционирования, которая характеризует выходной результат анализа функционирования оборудования, будем называть *выходной ситуацией (S'')*.

События функционирования оборудования (Z) характеризуют предысторию функционирования этого оборудования, т. е. функционирование, которое предшествовало текущему моменту времени. Все события функционирования подразделяются на три типа: точечные, интервальные и комбинированные.

Точечным событием функционирования (ZT) называется событие, характеризующее собой переход из одного состояния в другое параметра функционирования оборудования, или комбинированного события, или ситуации функционирования.

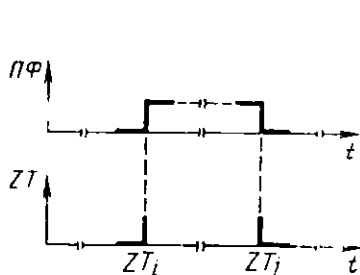


Рис. 6.17. Отношения предметных переменных для точечных событий «Быть одним — стать другим»

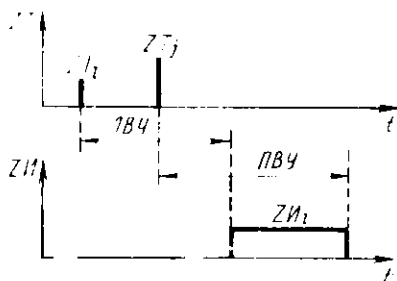


Рис. 6.18. Отношения предметных переменных для интервальных событий «Задать временной интервал анализа»

Интервальным событием функционирования оборудования (ЗИ) называется событие, характеризующее собой временной интервал анализа функционирования оборудования, определяемый временными уставками, отсчитываемыми от сигналов точечных событий, или неизменное состояние на временном интервале анализа параметра функционирования оборудования (комбинированного события, ситуации функционирования).

Комбинированным событием функционирования оборудования (ЗК) называется событие, характеризующее собой определенную расстановку во времени точечных событий, интервальных событий, ситуаций и промежуточных комбинированных событий.

Описанием события функционирования оборудования (ОЗ) называется формальное представление события в виде совокупности следующих элементов описания: имя события, тип события (точечное, интервальное, комбинированное), логическая функция события.

Логическая функция события представляет собой предикат, описываемый таблицей (формализованным бланком), задающий следующие отношения предметных переменных:

- для точечных событий (рис. 6.17) «Быть одним — стать другим»;
- для интервальных событий (рис. 6.18) «Задать временной интервал анализа (ВИА)», т. е. «Быть больше левой временной установки (ЛВУ)», отсчитываемой от точечного события, но меньше правой временной установки (РВУ), отсчитываемой от точечного события того же или другого, а также «Быть неизменным на временном интервале анализ» (ВИА) (рис. 6.19);

- для комбинированных событий (рис. 6.20) «Совпадать» (СОВ), «Примыкать слева» (ПРЛ), «Пересекаться» (ПЕР), «Быть внутри» (ВНТ), «Быть внутри справа» (ВНП), «Быть внутри слева» (ВНЛ), «Быть внутри посередине» (ВНС), «Быть раньше» (РАН).

Сигналом наличия события называется сигнал, формируемый в момент, когда логическая функция в реальных условиях функционирования оборудования принимает значение истинно. Сигналы наличия события могут быть мгновенными и интервальными.

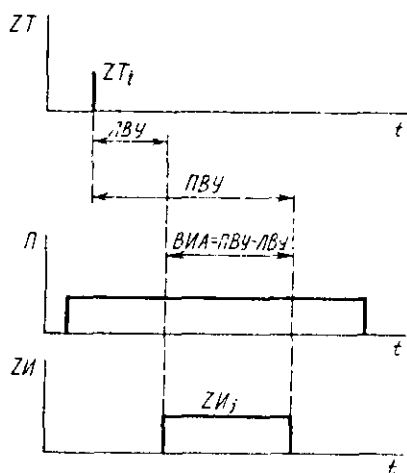


Рис. 6.19. Отношения предметных переменных для интервальных событий «Быть неизменным на временном интервале анализа»

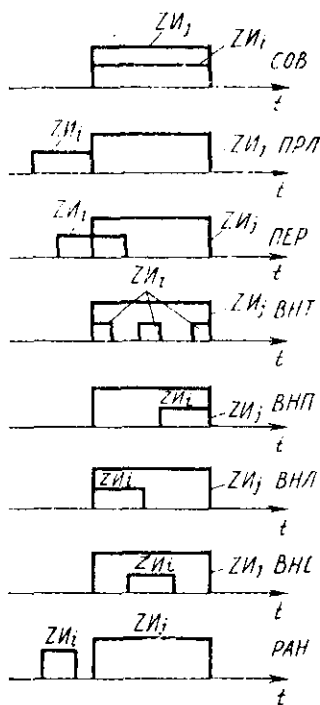


Рис. 6.20. Отношения предметных переменных для комбинированных событий

Для точечного события наличие сигнала события обозначается символом Е (есть), для интервального события наличие сигнала события обозначается символом Н (начало), или П (происходит), или К (конец). Для комбинированного события наличие сигнала события обозначается символом Е, или Н, или П, или К.

В случае, когда к рассматриваемому моменту реального функционирования оборудования логическая функция события не принимает значение истинно, то в зависимости от причины, из-за которой это происходит, событию (точечному, интервальному, комбинированному) может быть присвоен символ Р (рано). В случае, когда логическая функция события приняла значение истинно в момент времени, предшествующий рассматриваемому времени функционирования, то событию (точечному, интервальному, комбинированному) присваивается символ Б (было). Все указанные символы Е, П, Н, Р, Б называют состояниями понятия события функционирования оборудования ГАП (СЗ). Содержание символов Е, П, Б проиллюстрировано на рис. 6.21, а символов Р, Н, К, Б — на рис. 6.22.

Предметной переменной события функционирования оборудования ГАП называется предметная переменная его логической функции. Значение предметной переменной события функционирования называется аргументом события.

Предметными переменными события функционирования могут быть:

- для точечных событий: параметр функционирования, комбинированное событие функционирования, ситуация функционирования;
- для интервальных событий: точечное событие функционирования, параметр функционирования, комбинированное событие функционирования, ситуация функционирования, реальное время функционирования ($T_{РВФ}$);
- для комбинированных событий: точечное событие функционирования, интервальное событие функционирования, ситуация функционирования, комбинированное событие функционирования.

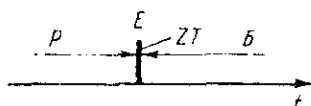


Рис. 6.21. Содержание символов Е, Р, Б для точечного события

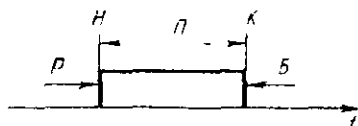


Рис. 6.22. Содержание символов Р, Н, П, К, Б для интервального события

Аргументами события функционирования могут быть состояния: параметра функционирования, события (точечного, интервального, комбинированного), ситуации, значение времени функционирования.

Комбинированное событие, которое при описании предметной области становится предметной переменной другого комбинированного события, называется *промежуточным комбинированным событием* (ZK').

Параметр функционирования оборудования ГАП (ПФ) — это исходная характеристика функционирования оборудования, используемая при описании модели предметной области типового программного комплекса (ПК), анализа функционирования этого оборудования, а также для представления входной информации ($J_{вх}$) этого ПК.

Параметры функционирования оборудования ГАП подразделяются на следующие два основных типа: наблюдения (X) и управления (Y). В свою очередь, параметры наблюдения подразделяются на аналоговые (XA) и сигнальные (XS).

Параметры наблюдения, измеряемые в цепи обратной связи оборудования, подразделяются на следующие три основных типа: навигационные (H), функциональные (F) и целевые (C).

Навигационные параметры характеризуют пространственное состояние элементов оборудования ГАП, функциональные параметры — функциональное состояние, а целевые характеризуют степень выполнения оборудованием ГАП заданной технологической операции. (т. е. цели управления).

Описанием аналогового параметра наблюдения (ОХА) называется формальное представление параметра в виде совокупности следующих

элементов описания: имя аналогового параметра, тип параметра (Н, Ф, Ц), логическая функция аналогового параметра.

Логическая функция аналогового параметра представляет собой совокупность предикатов, описываемых таблицей (формализованным бланком), задающих отношение «Быть больше нижней границы (НГ), но меньше верхней границы ВГ)». Каждому из этих предикатов поставлено в соответствие число натурального ряда чисел (1,2,3,...).

Состоянием аналогового параметра наблюдения (СХА) называется число натурального ряда, соответствующее тому предикату логической функции этого параметра, который в реальных условиях функционирования оборудования принял значение истинно. Все предикаты логической функции функционального параметра имеют одну и ту же предметную переменную, которую будем называть *предметной переменной параметра*. Имя этой предметной переменной совпадает с именем аналогового параметра. В качестве предметной переменной аналогового параметра наблюдения могут использоваться функциональный, навигационный и целевой параметры, оборудования ГАП.

Значения предметной переменной аналогового параметра в реальных условиях функционирования оборудования могут представляться в относительной или абсолютных шкалах (°, метры, атмосферы, градусы и т.д.).

Описанием сигнального параметра наблюдения (ОХС) называется формальное представление параметра в виде совокупности следующих элементов описания: имя сигнального параметра, тип параметра (Н, Ф, Ц), логическая функция сигнального параметра.

Логическая функция сигнального параметра реализует таблично (формализованным бланком) отношение «Поставить в соответствие значение сигнального параметра в бинарной шкале ДА/НЕТ, БЫЛ/НЕ БЫЛ, ЗАМКНУТ/РАЗМКНУТ состоянию параметра, представляемого числами 1 и 2 натурального ряда».

Состоянием сигнального параметра наблюдения (СХС) называется число 1 или 2 натурального ряда, соответствующее определенному значению параметра в бинарной шкале, которое он имеет в реальных условиях функционирования ГАП.

Параметры управления подразделяются на два класса: внутренние (ВНТ) и внешние (ВНШ). Внутренние параметры управления характеризуют управляющие команды прямого канала управления, формируемые непосредственно во внутренней (локальной) системе управления оборудованием ГАП. Внешние параметры управления характеризуют управляющие воздействия, формируемые внешней системой управления оборудованием ГАП, например системой группового управления, или системой централизованного управления (т. е. системой управления верхнего уровня).

Описанием параметра управления функционированием оборудования ГАП (ОУ) называется формальное представление параметра в виде совокупности следующих элементов описания: имя параметра управления, тип параметра управления (ВНТ, ВНШ).

логическая функция параметра управления, реализующая таблично (формализованным бланком) отношение «поставить в соответствие значение параметра управления в бинарной шкале ВЫДАНА/НЕ ВЫДАНА состоянию параметра, представляемого числами 1 и 2 натурального ряда».

Состоянием параметра управления (СПУ) называется число 1 или 2 натурального ряда, соответствующее тому значению параметра управления в бинарной шкале, которое он имеет в реальных условиях функционирования оборудования ГАП.

Результат анализа функционирования оборудования ГАП (РЕЗ) — это обобщенная (выходная) характеристика функционирования оборудования, используемая при описании модели предметной области типового программного комплекса анализа функционирования оборудования, а также для представления выходной информации ($J_{\text{вых}}$) этого ПК.

В рамках рассматриваемой идеологии анализа функционирования оборудования ГАП результат анализа функционирования (РЕЗ) фактически представляет собой смысловое содержание тех ситуаций функционирования оборудования ГАП, которые определяют состав выходной информации $J_{\text{вых}}$ информационной модели типового ПК.

Описанием результата анализа функционирования оборудования ГАП (ОРЕЗ) называется формальное представление результата в виде совокупности следующих элементов описания:

— тип результата («штатно» (Ш), «нестатно» (НШ), «причина нештатного функционирования» (ПНШ), «запрещено» (З), «выдача командно-программной информации КПИ» (В), «прохождение КПИ» (П), «текущий режим» (Р);

— имя (порядковый номер результата);

— смысловое содержание результата;

— логическая функция результата, реализующая таблично (формализованным бланком) отношение «Присвоить ситуации смысловое содержание».

Состоянием результата проведения анализа функционирования оборудования ГАП будем называть тот конкретный состав выходной информации (тип, номер, смысловое содержание, элемент структуры оборудования), который соответствует ситуациям функционирования оборудования в реальных условиях его функционирования.

Предметной переменной результата анализа функционирования оборудования ГАП является ситуация функционирования оборудования, а аргументом — ее состояние.

Абстрактная модель предметной области, имеющая описанные выше базовые понятия и отношения, представляет собой связанную совокупность четырех универсальных структур (УС):

$УС_{\text{лф}}$ — параметров функционирования;

$УС_z$ — событий функционирования;

$УС_s$ — ситуаций функционирования;

$УС_{\text{рез}}$ — результатов анализа.

Графически эту модель можно представить в виде сети, вершинами которой являются названные универсальные структуры (УС), а дугами — отношения «Быть зависимым». На содержательном уровне такая абстрактная модель представляется совокупностью восьми «пустых» (незаполненных) формализованных бланков языка конкретизации предметной области анализа (табл. 6.3—6.10) и описанием правил их заполнения.

Конкретизация рассматриваемой абстрактной модели предметной области осуществляется путем заполнения универсальных структур описаниями (конкретами) соответствующих базовых понятий. Графически конкретизированную модель предметной области можно представить в виде сети (структуры), вершинами которой являются конкрететы базовых понятий, а дугами — отношения «Быть зависимыми». В дальнейшем такую сеть будем называть *конкретизированной сетью активизации элементов модели предметной области*. На содержательном уровне конкретизированная модель предметной области представляется заполненными (конкретизированными) восемью формализованными бланками ЯКМ (см. табл. 6.3 — 6.10).

Таблица 6.3. Бланк (типа ВХС) сигнальных параметров наблюдения

Тип параметра	Индекс параметра	Условный адрес параметра	Логическая функция параметра	
			значение параметра	состояние параметра
Ф	КЛ	103	Замкнут, разомкнут	1,2
Ф	ЛМ	104		1,2
Ф	РС	106	»	1,2
Ф	ДЕ	107	»	1,2
Ф	ЕЖ	108	»	1,2
Ф	ЗИ	109	»	1,2

Таблица 6.4. Бланк (типа ВХА) аналоговых параметров наблюдения

Тип параметра	Индекс параметра	Условный адрес параметра	Размерность значения	Логическая функция параметра		
				нижняя граница (НГ)	верхняя граница (ВГ)	присваиваемое состояние параметра
Н	ОП	105	мм	180	200	1
				0	179	2
				201	300	3
Н	ИК	110	градус	100	110	1
				0	99	2
				111	200	3

Таблица 6.5. Бланк (типа БУ) параметров управления

Тип параметра	Индекс параметра	Условный адрес параметра	Логическая функция параметра	
			значение параметра	состояние параметра
ВНТ	РК5	95	Выдана	1
			Не выдана	2

Таблица 6.6. Бланк (типа БЗТ) точечных событий

Индекс события	Условный адрес события	Логическая функция события			
		тип предметной переменной	индекс предметной переменной	состояние (значение), в котором была предметная переменная	состояние (значение), в которое перешла предметная переменная
ZT1	100	XC	КЛ	2	1
ZT2	101	У	РК5	2	1
ZT3	102	XC	ДЕ	1	2
ZT4	103	XC	ЕЖ	2	1
ZT5	104	XC	ЗИ	1	2
ZT6	105	XC	ЛМ	2	1
ZT7	106	S	S ₁	2	1
ZT8	107	XC	ЛМ	1	2

Таблица 6.7. Бланк (типа БЗИ) интервальных событий

Индекс события	Условный адрес события	Логическая функция события						
		Предметная переменная со значением Е, по которой определяется временной интервал анализа (ВИА)		Левая временная установка (ЛВУ), отсчитываемая по параметру Т _{р.в.ф}	Правая временная установка (ПВУ), отсчитываемая по параметру Т _{р.в.ф}	Предметная переменная, состояние (значение) которой не изменяется на временном интервале анализа		
						тип	индекс	неизменяемое состояние (значение)
ZH1	20	ZT	ZT1	10	15	—	—	—
ZH2	21	ZK	ZK1	0	10	—	—	—
ZH3	22	ZT	ZT7	0	—	—	—	—
—	—	ZT	ZT8	—	0	—	—	—
ZH4	23	ZK	ZK3	20	40	—	—	—
ZH5	24	ZK	ZK4	70	—	—	—	—
—	—	—	ZK5	—	60	—	—	—
ZH6	25	ZK	ZK4	70	—	—	—	—
—	—	—	ZK5	—	60	XH	ИК	1

Таблица 6.8. Бланк (типа БЗК) комбинированных событий

Индекс события	Условный адрес события	Логическая функция события						
		Первая предметная переменная отношения			Тип отношения	Вторая предметная переменная отношения		
		тип	индекс	значение		тип	индекс	значение
ZK1	300	ZI	ZI1	П	COB	ZT	ZT2	Е
ZK2	301	ZI	ZI2	П	COB	ZT	ZT6	Е
ZK3	302	ZI	ZI3	П	COB	ZT	ZT3	Е
ZK4	303	ZI	ZI4	П	COB	ZT	ZT4	Е
ZK5	304	ZI	ZI3	П	COB	ZT	ZT5	Е

Таблица 6.9. Бланк (типа БС) ситуаций

Класс ситуации	Тип ситуации	Индекс ситуации	Условный номер ситуации	Логическая функция ситуации
В	SP	S1	500	$(ZK2 = E) \wedge (OP-1) \wedge (PC-1)$
В	SB	S2	501	$ZI1 = П$
В	СП	S3	502	$ZK2 = Н$
В	SP	S4	503	$ZI3 = П$
Ш	SB	S5	504	$ZI6 = П$
НШ	SB	S6	505	$(ZI5 = П) \wedge ((ИК = 2) \vee (ИК = 3))$

С целью более глубокого уяснения процесса конкретизации абстрактной модели предметной области автоматизируемого процесса анализа рассмотрим следующий пример: пусть имеется некоторый текст (фрагмент) Инструкции по проведению анализа функционирования оборудования ГАП. Требуется содержание этого фрагмента представить в приводимых восьми формализованных бланках, с тем чтобы в дальнейшем ввести это содержание в ЭВМ с помощью информационно-интерпретирующей системы и тем самым конкретизировать (специализировать, настроить на конкретное оборудование ГАП и технологию) имеющуюся в ЭВМ абстрактную модель типового программного комплекса анализа функционирования оборудования. При этом фрагмент инструкции имеет следующее содержание (рис. 6.23).

Если сигнальный контролируемый параметр КЛ перейдет из разомкнутого состояния (Р) в замкнутое (З), то спустя 10 с после этого и не позднее 15 с необходимо выдать команду управления РК5. Если не позднее 10 с после выдачи РК5 контролируемый параметр ЛМ перейдет из состояния «разомкнут» в состояние «замкнут», т. е. РК5 прошла и при этом аналоговый контролируемый параметр ОП находился в пределах 180—200 мм, а сигнальный контролируемый параметр РС находился в замкнутом состоянии, то начался режим «Ориентация за-

Таблица 6.10. Бланк (типа БРЕЗ) результатов

Тип результата	Индекс результата	Условный номер результата	Логическая функция результата	
			Смысловое содержание результата	Индекс выходной ситуации
SB	PE31	601	Необходимо выдать разовую команду РК5	S2
СП	PE32	602	Разовая команда РК5 прошла	S3
SP	PE33	603	Начался режим «Ориентация заготовки»	S1
SP	PE34	604	Продолжается режим «Ориентация заготовки»	S4
Ш	PE35	605	Ориентация заготовки и подготовка оборудования для ее обработки произведены правильно	S5
НШ	PE36	606	Ориентация заготовки и подготовка оборудования для ее обработки произведены неправильно	S6

готовки», который будет продолжаться до тех пор, пока параметр ЛМ возвратится в состояние «разомкнуто».

Если во время отработки режима «Ориентация заготовки» сигнальный контролируемый параметр ДЕ перешел из замкнутого состояния в разомкнутое и спустя 20 с после этого, но не позднее 40 с сигнальный контролируемый параметр ЕЖ перешел из разомкнутого состояния в замкнутое, и спустя 70 с после этого и не позднее 60 с после того, как сигнальный контролируемый параметр ЗИ перешел из состояния «замкнут» в состояние «разомкнут», аналоговый контролируемый параметр ИК имеет значение 100—110 град, то следует сделать вывод, что «Ориентация заготовки и подготовка оборудования для ее обработки произведены правильно». Если же при этом параметр ИК имеет значение, выходящее за пределы 100—110 град, то следует сделать вывод, что «Ориентация заготовки и подготовка оборудования для ее обработки произведены неправильно».

В самом общем виде методику заполнения формализованных бланков языка конкретизации модели предметной области по этому фрагменту «Инструкции» можно охарактеризовать следующим образом.

Вначале просматривают фрагмент «Инструкции» и определяются типы и индексы всех параметров функционирования, а также дискретные состояния аналоговых параметров наблюдения. На основе полученной информации заполняются бланки параметров (табл. 6.3—6.5). Затем исходя из текста фрагмента определяются точечные события и их логические функции, аргументами которых являются параметры функционирования оборудования. Полученная по точечным событиям информация заносится в соответствующий бланк (табл. 6.6). После получения точечных событий, определяемых параметрами функционирования, целесообразно найти перечень и логические функции интервальных событий, левые и правые временные установки которых задаются от этих точечных событий. Полученная при этом информация заносится в бланк интервальных событий (табл. 6.7). До этого момента фрагмент «Инструкции» просматривался в прямом направлении, т. е. от параметров к результатам анализа. С этого момента (т. е. с момента нахождения интервальных событий, определяемых точечными событиями, которые находятся по параметрам функционирования) фрагмент «Инструкции» целесообразно просматривать в обратном направлении (т. е. от результатов к ситуациям, комбинируемым событиям и т.д.). При этом заполняется вначале бланк результатов (табл. 6.10), а затем в зависимости от цепочек, порождаемых каждым результатом анализа при обратном просмотре фрагмента «Инструкции», заполняются бланк ситуаций (табл. 6.9), бланк комбинируемых событий

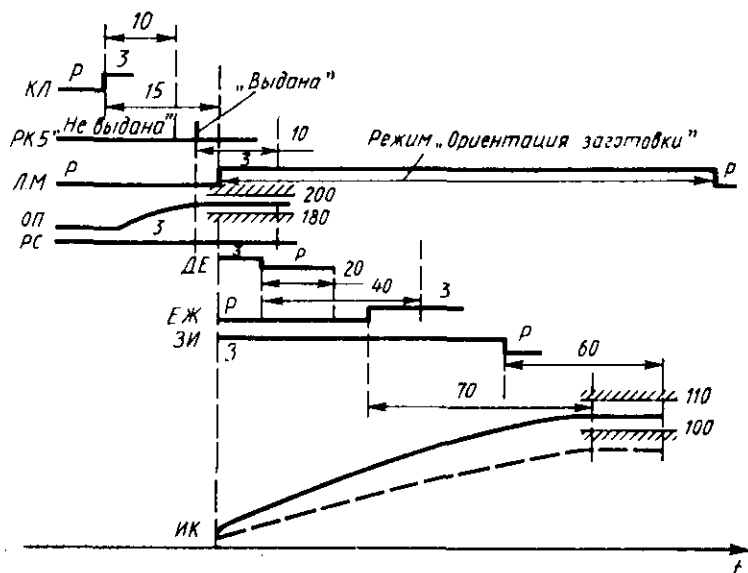
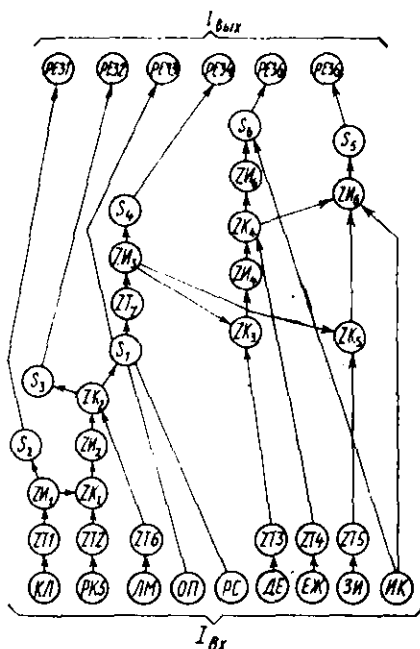


Рис. 6.23. Циклограмма поведения контролируемых параметров и выдачи команд управления

Рис. 6.24. Конкретизированная сеть активизации

(табл. 6.8) и недостающие описания (конкреты) бланков интервальных и точечных событий.

Реализация идеологии программной универсализации на персональной ЭВМ. Рассмотренная выше идеология программной универсализации применительно к задаче анализа функционального состояния оборудования ГАП реализована в виде пакета прикладных программ (ППП), «обучаемый интеллектуальный контроллер (ОИК)» для персональной ЭВМ типа IBM PC XT (ЕС—1841). Основные характеристики этого ОИК: количество анализируемых одновременно входных параметров составляет — 500 аналоговых и 1000 сигнальных параметров наблюдения, 500 параметров управления; функционально неограниченное количество событий (точечных, интервальных, комбинированных), ситуаций, результатов анализа; быстродействие ОИК при количестве событий и ситуаций, равным 1000, составляет 0,1 с на анализ одного существенного значения входного параметра.



§ 6.5. ГРУППОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ОБЛАСТИ ГИБКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Групповая технология применяется в «классических» видах производства. В настоящее время она представляет собой философскую базу методологии подетального профилирования, функционального решения производственных ячеек, гибких производственных систем и линий. Представляет, скорее, общие указания, а не совокупность строго установленных процедур.

Одним из основных общих признаков производственной деятельности является обработка информации на базе многочисленных массивов данных. Для каждого производства требуются сбор, преобразование, хранение, анализ и модификация информации. В области операций с данными также появляется новое пространство для применения групповой технологии.

Автоматизация операций и обработки данных представляет собой первый шаг на пути к интеграции важнейших этапов производства от приема заказов, разработки технологических процессов, составления

программ для станков с ЧПУ, оперативного планирования и других функций до конструирования и проектирования.

Производственные данные, как правило, делятся на следующие:

- об изделиях, которые описывают объект производства на стадии проектирования и производства. Сюда относятся геометрические данные (форма, размеры, определение допусков), данные о физических свойствах и состоянии (материал, данные о термической и других видах обработки и число изделий);

- о процессах и функциях, которые описывают применяемые технологические процессы, применяемый инструмент, станки, а также работу оборудования и человека;

- о правилах подготовки производства, включающие в себя различные виды спецификации, аналитические программы, определенные последовательности, критерии выбора и т.п.

Групповые анализ и концепции позволяют согласовать массивы данных с применением вычислительной машины при минимальном участии человека. Необходимо проводить рационализацию массивов данных, а также различать их значение. Важным прежде всего является их структурирование с применением соответствующей логики. Здесь применяются методы классификации, обусловленные групповой технологией. Классификация определяется как группирование объектов по общим признакам и их соединение в пары по разным признакам. Признаки классификации с учетом базы данных необходимо выбирать объективно. Важно определять их таким образом, чтобы сохранялась их однозначная логика.

Логическим является прежде всего иерархическое структурирование. Оно используется и в групповой технологии (ГТ-классификация, ГТ-коды). В некоторых случаях можно идти только по направлению сверху вниз. В других случаях можно использовать выборочную последовательность. Возможно также применение принципов рекуррентности и принципов взаимодействия.

При классификации можно с успехом применять теорию графов. Сконструированные графы могут служить для изображения проектов и характеризовать их посредством массива данных, обозначаемых соответствующим кодом. В случае автоматизированных производственных систем данный код может быть выражен в двоичной системе и храниться в памяти вычислительных машин. У частично автоматизированных и менее сложных систем коды и признаки можно получать в легко понятной форме (например, пиктограммы).

Системы классификации, которые основываются на принципах групповой технологии, широко применяются в производственном процессе, особенно при:

- поиске данных для проектирования и дизайна;
- увеличении серийности и переходе к высшим формам производства;

- стандартизации групповых процессов, формировании групповых технологий;
- упрощении материальных и информационных потоков;
- создании автоматизированных систем конструирования и проектирования;
- стандартизации информации, построении рациональной базы данных и т. п.

В настоящее время внимание обращается на проблемы унификации данных в более широком смысле (связь со сбытом, снабжением, хранением и т.п.). Массивы упорядоченной информации можно преобразовать в структурированную логическую схему. При данном структурировании может использоваться одна и та же иерархия на всех уровнях от классификации геометрии деталей, параметров и данных производственного процесса до выхода из производства. Массивы данных являются основой главного массива данных и в отношении их существуют широкие возможности применения на всех уровнях и этапах производственного процесса. В результате получения необходимых соотношений между данными внутри массивов и между массивами возможности их использования возрастают и являются практически основой для информационной совместимости подготовки производства и производственного процесса.

Упорядоченная структура соотношений достигается в результате построения и использования архитектуры групповой так называемой GT-информационной и управляющей системы. GT-система основывается на GT-кодах.

Проблематика моделирования и распознавания геометрии объектов и их качественных и количественных характеристик связана с созданием оптимизированных массивов данных. Существует ряд подходов к моделированию геометрии объектов. Традиционные подходы связаны с идентификацией, классификацией и моделированием макрогеометрии, размерных и других характеристик объектов. Системы CAD/CAM должны были бы содержать массив данных для моделирования геометрии объектов и их технологических свойств. Было определено несколько подходов к моделированию и распознаванию объектов, среди которых важное место занимает подход, который основывается на применении GT-кода (геометрическо-технологический код).

Исходной базой для генерирования GT-кода является геометрическое моделирование, основывающееся на применении GSC (конструктивно-типовая геометрия). Метод GSC является наиболее выгодным и наиболее простым методом описания геометрии объектов. В соответствии с данным методом геометрию объекта можно получить путем синтеза внешних и внутренних простых геометрических элементов

$$s = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_m - Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_n \quad \bigcup_{i=1}^m P_i - \bigcup_{i=1}^m Q_i,$$

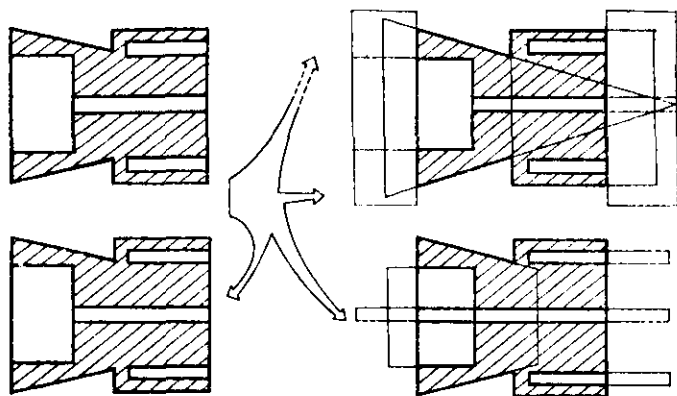


Рис. 6.25. Мультивариантное моделирование объектов

где s — геометрия моделируемого объекта; $\cup$ — символ объединения; P_i — простые геометрические элементы (внешние); Q_i — простые геометрические элементы (внутренние).

Моделирование геометрии объектов на основании метода GSC обусловлено:

- P.1. парциальным множественным определением S .
- P.2. мультивариантным моделированием S (рис. 6.25).
- P.3 неявным выражением соединения поверхностей.

Условия P.1, P.2 и P.3 учитываются при генерировании GT-кода. Основные проблемы получения GT-кода связаны с:

PR.1 генерированием специальной геометрической информации, которая необходима для однозначного определения геометрии объекта и которая учитывает условия P.1 и P.2.

PR.2 выбором парциальных геометрических элементов для определения и распознавания макрогеометрии моделируемого объекта.

PR.3 выбором признаков «качественной» геометрии для определения и распознавания семантико-геометрических признаков объектов. Новый вид GT-кода определяется соотношением

$$GT = \{UG, MG, SG\},$$

где UG — единственный геометрический код, полученный на основании требования PR.1, который гарантирует однозначное определение S ; MG — макрогеометрический код, полученный на основании требования PR.2, который определяет макрогеометрические признаки; SG — семантико-геометрический код, который определяет качественные признаки семантической геометрии и условия PR.3.

Собственный код UG выражается посредством соотношения

$$UG = \{L, D, T, RL, RD, FA, FU, SI\},$$

где L — длина главной оси соединенных поверхностей; D — диаметр поверхности; T — угол, который главная ось образует с поверхностью; RL — относительное положение объединенной поверхности объекта по отношению к осевому направлению; RD — относительное положение объединенной поверхности объекта по отношению к радиальному направлению; FA — модель геометрического изображения объединенной поверхности; FU — код функциональных характеристик объединенной поверхности; SI — код характеристик качества объединенной поверхности.

Собственный код MG выражается посредством соотношения:

$$MG = \{TL, HP, HN, FF, MF, BI, MM\},$$

где TL — максимальная длина объекта; HP — концентрическая форма отверстия; HN — число концентрических фасонных отверстий; FF — код характеристик; MF — код низшей точности; BI — код термообработки; MM — относительное положение отверстия с максимальным диаметром.

Собственный код SG выражается посредством соотношения

$$SG = \{LD, MD, DI, SD, SL, RS\},$$

где LD — семантически выраженный осевой геометрический код; MD — семантически выраженный код диаметра; DI — аспект вариантности диаметров; SD — диапазон изменения диаметров; SL — код диапазона изменений осевой длины; RS — аспект геометрической сложности кода.

Посредством конструкторской и типовой геометрии в системах CAD можно получать модели посредством геометрии объектов и составлять необходимые данные о применении и использовании объектов.

Диаграмма движения последовательности показана на рис. 6.26. У последовательности предполагается частное определение S , вариантное моделирование S и неявное выражение соединения двух поверхностей. При формировании GT-кода требуется генерирование специальной геометрической информации, выбор парциальных геометрических элементов для определения и распознавания макрогеометрии моделируемого объекта и выбор качественных признаков для определения и распознавания объекта. GT-код включает в себя совокупность парциальных кодов (UG — единственный геометрический код, MG — макрогеометрический код, SG — семантико-геометрический код, который учитывает качественные признаки геометрии объекта). В результате применения системы CAD можно перейти от формирования геометрической модели к технологической модели, которая является основой для разработки программ для станков с ЧПУ. Систему конструкторско-геометрических моделей и кодов можно использовать также для независимого программирования роботов.

Системы GT-кодов разрабатывают пользователи в соответствии с базой изделий. GT-система содержит логический «манипулятор» принятия решения, систему программирования, которая упорядоче-

на для хранения, поиска и генерирования связей между данными, причем как в процессе проектирования, так и в процессе производства. Предполагается, что GT-системы наиболее полно удовлетворяют целям интегрирования и автоматизации. Они называются GPP-системами (Generative Process Planning), причем GPP-системы автоматически генерируют оптимальные производственные процессы. В качестве входов в них используются результаты конструирования, которые должны быть приспособлены к производственной логике. Необходимо отметить, что существуют еще системы VPP (Variant Process Planning). В случае данной системы создаются варианты в соответствии со стандартным образцом. Модификация используется у сходных деталей. Системы GPP являются перспективными и при создании интегрированных производств с управлением от вычислительной машины. Групповая технология выполняет важную методологическую функцию при проектировании заводов будущего. Она является также основой создания экспертных систем, в которых используются элементы

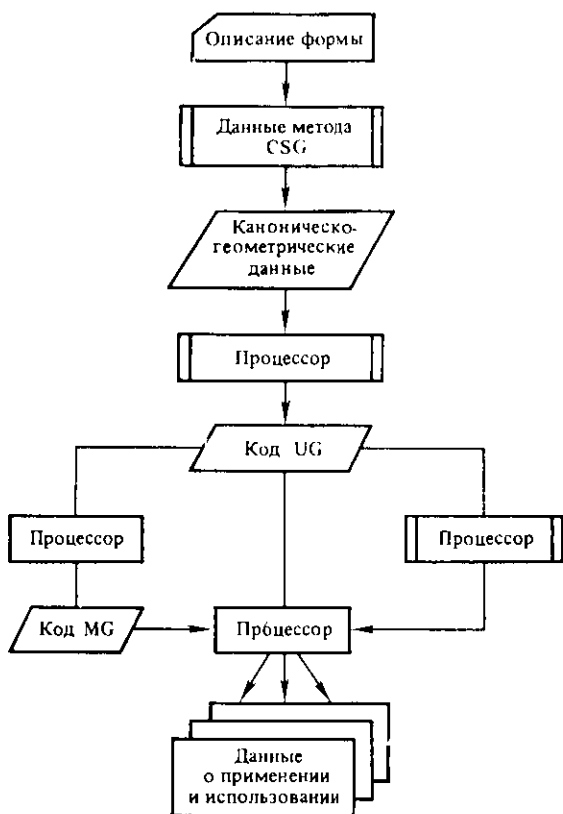


Рис. 6.26. Диграмма последовательности формирования GT-кодов

искусственного интеллекта. Экспертные системы определяются как «интеллектуальные» программы вычислительных машин, которые используют формализованную базу знаний, а также формализованные способы решения данных задач с рассуждениями, которые для человека являются очень трудоемкими. Существует стремление развернуть современные ГТ-системы в интеллектуальные экспертные системы. Правда, для их разработки требуется специалист-эксперт, причем не только в области вычислительных машин, но и в области инженерного труда и производственных технологий.

§ 6.6. ГИБКОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

С развитием технических средств с программным управлением наступает период перехода к автоматизации производственных процессов машиностроения в области мелко- и среднесерийного производства. Возможность объединения станков с ЧПУ транспортным оборудованием и средствами манипуляции без жесткой связи открывает путь к созданию *гибких производственных систем* (FMS — *flexibilite manufacturing system*). Определение ГПС в общем случае предполагает применение станков с ЧПУ или системой управления типа CNC, которые связаны между собой автоматическими устройствами для транспортировки и манипуляции объектами производства и инструментами, работа которых управляется и координируется вычислительной машиной. Термин «гибкость» выражает способность адаптации системы к смене изделий при ее работе.

При индивидуальном или групповом применении станков с ЧПУ, обслуживаемых оператором без существенной автоматизации материального и информационного потока, категория гибкости по технико-экономическим показателям не выходит на передний план. В данных случаях гибкость распространяется только на последовательность технологических операций или переходов у данного спектра деталей. Гибкость операционного манипулирования «скрыта» в обслуживании — ловкости человека.

Возможность передачи манипуляционных функций от человека промышленному роботу, функций управления манипуляционным и транспортным оборудованием, а также вопросов принятия решения машинным вычислительным системам позволяет создавать комплексные автоматизированные системы без обслуживания человеком. Данное обстоятельство уже в ходе проектной подготовки выдвигает на передний план вопрос: для какого спектра деталей и объема функций создавать системную конфигурацию гибкого производства и как оценивать, планировать и проектировать новые производственные системы, чтобы они обладали хорошей гибкостью?

В последнее время обсуждается вопрос определения гибкости производства. Определяются и создаются категории гибкости, отнесенной к гибкости технологического процесса, гибкости объемов производства, гибкости в области расширения функций ГПС, гибкости планиро-

вания, гибкости на уровне завода и др. Появляются определения так называемой смешанной гибкости, которая касается способности системы к проведению параллельных изменений в технологических и манипуляционных функциях, а также в области математического обеспечения. Это означает, что система обеспечивает производство родственных групп деталей, для которых она была спроектирована, причем по сути в случайной последовательности без существенных различий в значениях времени их подачи.

Равным образом все определения основываются на общем определении гибкости, которое трактуется как «способность системы быстро приспосабливаться к изменениям в системе или изменениям в окружающей среде». Понятие быстрого приспосабливания следует понимать как относительное понятие. Появление изменения в принципе вызвано изменением вида изделия или поломкой какого-либо вида оборудования, причем условие быстрого восстановления работоспособности системы при новом режиме лимитировано минимальными потерями в производительности.

Элементы производственной системы, а также производственная система и окружающая среда имеют сложные материальные и информационные связи (рис. 6.27). Такая производственная ячейка является открытой единицей, объединяющей элементы производственных, манипуляционных и управляющих функций. В принципе какое-либо изменение деталей обуславливает ряд изменений как внутри самой производственной ячейки, так и в ее связях с окружающей средой. Изменяются содержание и параметры функций. Сходство двух следующих друг за другом деталей существенно влияет на объем изменений.

Изменение изделия		
Изменение технологических функций	Изменение манипуляционных и транспортных функций	Изменение математического обеспечения
замена инструментов	замена носителей	изменение управляющей программы системы
замена крепежных элементов	смена захвата	изменение управляющей программы станка
изменение исходных точек инструментальных головок	включение принимающих станций	изменение управляющей программы робота
задание вспомогательных функций (охлаждение, очистка)	использование накопителей	изменение управления транспортными путями
	задание зажимного усилия захвата	

Сильное несходство деталей влияет на изменение системы в большей мере, чем это бывает в случае сходных деталей. Часто это приводит к дополнению системы новыми функциями и разработке нового математического обеспечения.

Вызванные в материальном и информационном потоке изменения и содержание функций реализуются в течение определенного времени, в ходе которого производственная ячейка не производит продук-

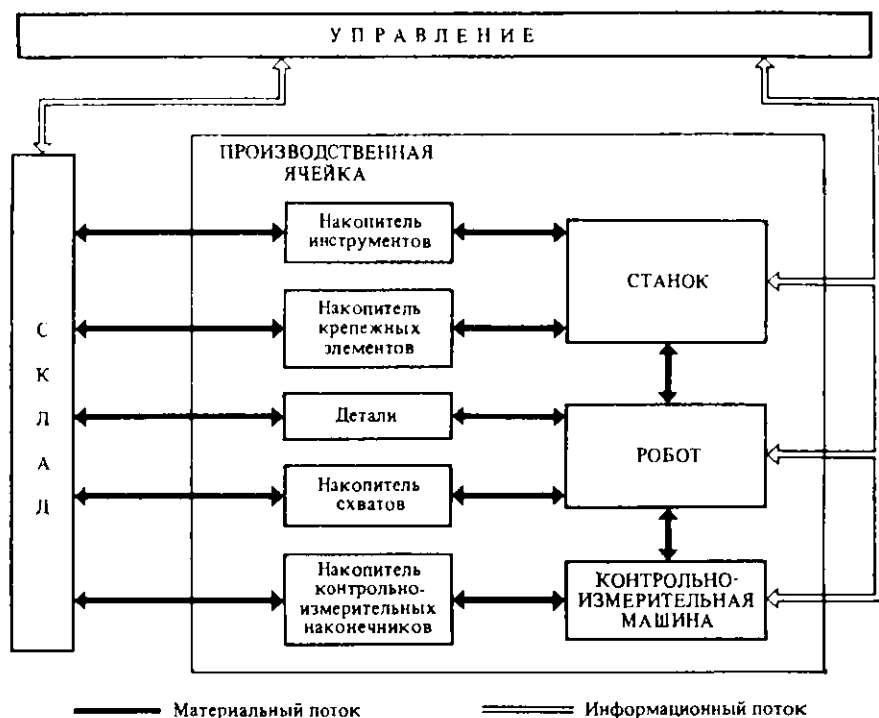


Рис. 6.27. Связи производственной системы

цию вообще или может производить с меньшей производительностью, а именно зависимость производительности и времени должна являться решающим критерием оценки гибкости. Другим критерием оценки гибкости является число типов деталей, которые система может обрабатывать без новых капитальных вложений. Фонд времени операций на уровне рабочей ячейки состоит из времени технологической обработки и из времени переналадки:

$$T = T_h + T_z,$$

где T_h — время технологической обработки; T_z — время переналадки.

Время T_h в производственных системах представляет собой сумму времен отдельных партий и его можно выразить посредством соотношения

$$T_h = T_{o.v} = \sum_{i=1}^k n t_{oi} \cdot m,$$

где n — число объектов производства в партии; t_{oi} — операционное время объектов производства; m — повторяемость партии; k — число видов объектов производства.

Время T_z — полное время переналадки системы, и его можно выразить посредством соотношения

$$T_z = \sum_{i=1}^k m_i \cdot t_{zi},$$

где t_{zi} — время переналадки на i -ю партию.

Гибкость p можно выразить в виде доли времени обработки объектов производства в общем времени T_0 в зависимости от числа видов объектов производства и размера партий:

$$p = T_0 / (T_0 + T_z).$$

Понятно, что в результате частой и длительной переналадки падает производительность производственной ячейки.

Развитие ГПС в значительной мере сдерживается недостаточной гибкостью в области математического обеспечения. Для этого есть несколько причин. Прежде всего это касается использования в ГПС новых процессов. Форматы и виды данных начали формироваться с момента внедрения станков с ЧПУ, и они, в принципе, являются стандартизированными. Для новых процессов требуются новые форматы и виды данных. Поэтому в настоящее время уже говорят о необходимости создания более широких банков данных — на уровне общезаводских мероприятий. Гибкость банка данных влияет на общезаводскую гибкость и рассматривается как новый ключ к построению производственных систем более высокого уровня.

Существующие мнения сходятся в том, что для достижения высокой гибкости решающим фактором является гибкость системы и применяемых технических средств (аппаратные средства). Появились проекты так называемого метаморфического оборудования. У данного вида оборудования рабочие узлы меняются таким образом, что при новой переналадке в системе устанавливается новый узел, который приспособлен к новому изделию как в конструкторско-геометрическом, так и в функционально-технологическом отношении.

Глава 7

ТЕХНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПОДСИСТЕМЫ ГИБКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

§ 7.1. СОВРЕМЕННЫЕ ДВИГАТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ С ЧПУ

Функционирование автоматизированных станков и роботов предполагает управление перемещением по крайней мере по одной оси. Производственное оборудование имеет несколько осей перемещения, посредством которых обеспечивается результирующее перемещение активного органа (инструмент, захват, технологическая головка и т.п.).

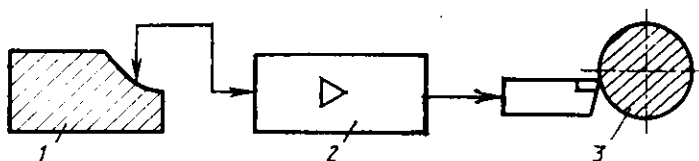


Рис. 7.1. Схема управления при открытой цепи:

1 — программное оборудование; 2 — усилитель; 3 — управляемый станок (процесс)

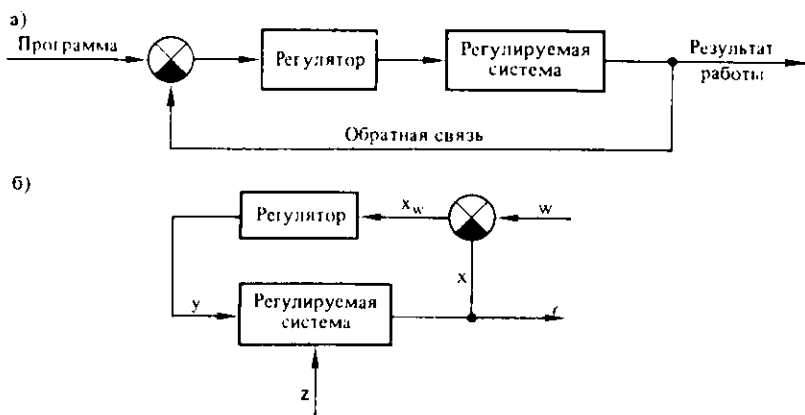


Рис. 7.2. Схемы автоматического саморегулирования:

а — основная схема закрытой цепи регулирования; б — другая схема цепи регулирования; x — регулируемая величина, w — требуемая величина, x_w — отклонение регулирования, y — величина регулирующего воздействия, z — возмущения

При управлении станком необходимо знать соответствующую программу работы, внешние условия и внутреннее состояние управляемого процесса или оборудования. Если внешние условия и внутреннее состояние неизменны или изменяются в соответствии с заранее известными закономерностями (не случайным образом), то процесс управления можно обеспечить с помощью так называемого *автоматического управления*, при котором используется открытая схема управления. Схема такого принципа управления по осям перемещения представлена на рис. 7.1. Основной недостаток такого способа управления состоит в том, что случайные изменения (внешние факторы или изменения свойств управляемой системы) приводят к неверным результатам.

Высший уровень представляет управление с постоянным контролем результатов работы и постоянным сравнением полученных результатов с задачей, определенной в программе. Такой способ управления называется *автоматическим саморегулированием* (рис. 7.2). Способ представляет собой схему регулирования с обратной связью с параметрами, которые при управлении попадают в схему.

В устройствах с полуавтоматическим и автоматическим рабочим циклом все более широкое применение находят механизмы, предназначенные для одновременной передачи энергии и информации, т. е. сервомеханизмы. Оперативная подсистема, с одной стороны, обеспечивает непосредственное выполнение перемещений, например, манипуляционных переходов промышленного робота, технологических переходов станков, а с другой стороны, к ней относится сбор информации об окружающих систему объектах.

Осуществление перемещений в настоящее время обеспечивается исключительно системой сервоприводов.

Сервоприводы различают по нескольким признакам. Чаще всего они управляют электронными устройствами. Из элементной базы в аналоговых сервоприводах применяются интегрированные оперативные усилители, компараторы в цепях управления и выходных цепях сервоприводов, силовые транзисторы и тиристоры для управления приводными головками, потенциометры и тахогенераторы для измерительных систем. В сервоприводах с ЧПУ применяются прежде всего интегральные схемы малой и средней плотности для цепей ввода и управления. У комбинированных сервоприводов дополнительно применяются интегральные или гибридные цифроаналоговые или аналого-цифровые преобразователи. Из измерительных устройств это главным образом линейные оптические или индукционные измерительные устройства - линейки, индукосны или ротационные оптические или индукционные измерительные устройства шагового типа.

В цифровых и комбинированных цифроаналоговых сервоприводах могут применяться микропроцессоры или комплектные системы микроЭВМ (рис. 7.3).

Сердцевиной сервоприводов являются серводвигатели. С точки зрения формы преобразования энергии они делятся на пневматические,

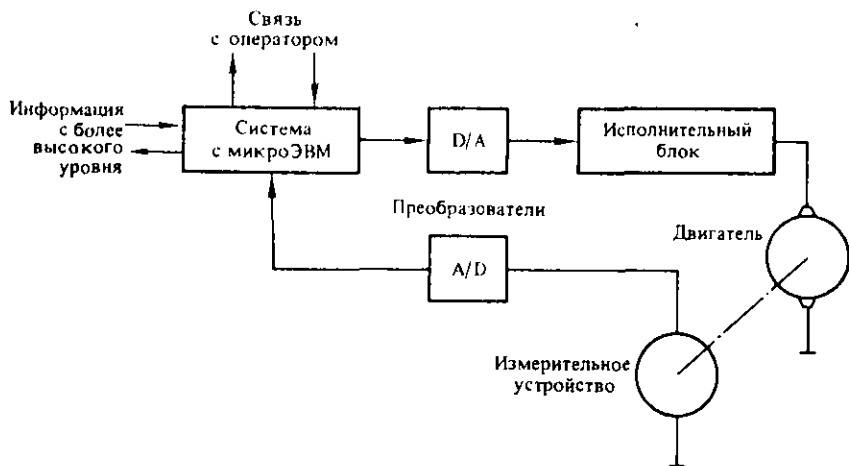


Рис. 7.3. Схема сервопривода с микропроцессором

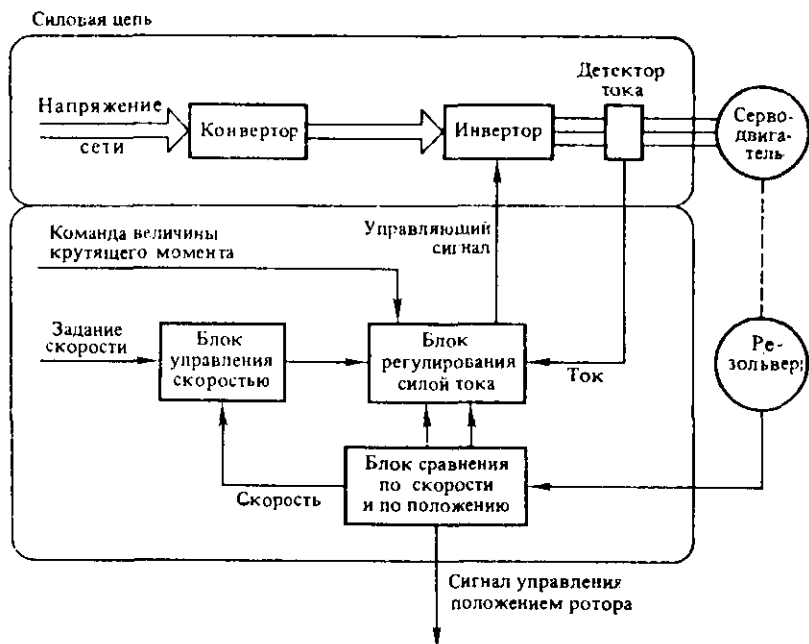


Рис. 7.4. Схема соединения блоков управления двигателя серии АС

гидравлические и электрические. Все эти двигатели в конкретных случаях применения имеют свои достоинства и недостатки. Они применяются не самостоятельно, а в соединении с системой управления, т.е. их функции программируются с верхнего уровня управления через связи по скорости и по положению.

При совершенствовании приводов станков и роботов первоочередное внимание уделяют электрическим приводам. При конструировании и в дальнейшей работе удовлетворяют требованиям получения высоких скоростей и мощности при малой массе, возможности регулирования тепловых параметров при сохранении стабильности выходных параметров, надежности и минимальным требованиям к техническому обслуживанию.

С целью получения малого момента инерции и высокого крутящего момента разработаны специальные однонаправленные двигатели. Это прежде всего двигатели с беспазовым якорем и двигатели с цилиндрическим магнитным ротором. Однако они подключаются через коллектор. Требования к повышению надежности, долговечности и удобства технического обслуживания щеток и коллектора привели к разработке бесколлекторных однонаправленных двигателей.

Конфигурация прогрессивного сервопривода типа РА показана на рис. 7.4. Сервопривод предназначен для высоких скоростей и боль-

ших крутящих моментов, обладает достоинствами бесколлекторных двигателей, нетребователен в обслуживании. В нем используются мощные магниты. Питание осуществляется от сети. Конвертор выпрямляет напряжение сети до постоянной величины. Инвертор в зависимости от управляющего сигнала от блока управления преобразует данное напряжение в переменное, которое подается на серводвигатель. Возникают импульсы напряжения, переменная ширина которых используется для управления двигателем.

Значение питающего напряжения и его частота определяются управляемыми параметрами тока. В блок управления поступают команды требуемой скорости и крутящего момента, а также сигнал сенсорного датчика положения — резольвера, который является составной частью двигателя. В блоке управления скоростью происходит сравнение и оценка фактической скорости с заданной. Контрольный сигнал скорости и положения резольвера, так же как и значение тока на выходе из силовой части, и ток, характеризующий значение требуемого крутящего момента, обрабатываются в блоке регулирования тока.

На выходе из конвертора имеем сигнал для управления инвертором, который определяет напряжение и частоту тока, питающего серводвигатель, для получения требуемой скорости. Для получения требуемого положения предназначен выходной сигнал положения ротора.

Инвертор сконструирован на базе силового транзистора (GTR). С целью получения модулированных импульсов PWM (Pulse With Modulation) предусмотрена адаптация управления таким образом, чтобы на входе в серводвигатель получалась аппроксимированная синусоидальная волна. На выходе из инвертора практически полностью отсутствует влияние гармоник высшего порядка.

Сравнение основных характеристик двигателей постоянного и переменного тока показано на рис. 7.5. На основании характеристик можно выявить области применения двигателей в приводах оборудования, предназначенного для гибкой автоматизации.

К основным достоинствам современных приводов относятся: вариантность, возможность получения непосредственного привода, высокий крутящий момент при низкой частоте вращения, применение полузамкнутой петли обратной связи системы с целью стабилизации влияния изменения операционной нагрузки, хорошее регулирование при низких скоростях с целью получения точного положения, совместимость с числовым и аналоговым программным управлением, а также несложная конструкция.

Техническое решение вопроса управления по одной оси перемещения иллюстрирует рис. 7.6. Механическое перемещение здесь интерпретируется как взаимодействие винта и гайки. Вращательное движение выполняет винт, а гайка совершает линейное перемещение. В результате устранения в передаче люфта появились решения, в которых вращательное движение совершает гайка. В цепь управления встро-

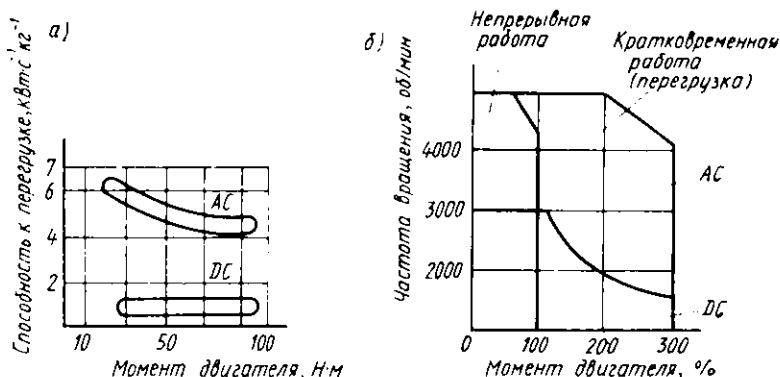


Рис. 7.5. Сравнение основных характеристик двигателей постоянного и переменного тока



Рис. 7.6. Пример технического решения вопроса управления по одной оси перемещения

ны серводвигатель, декодирующее устройство, блок управления и микроЭВМ. Сенсорные датчики положения обеспечивают точное позиционирование. Система управления передает сигналы команды для управления перемещением, а также выполняет команды, которые обеспечивают проверку перемещения. В системе встроены сенсорные датчики, которые позволяют изменять движение в зависимости от ситуации. В соответствии с блочной структурой (рис. 7.7) схема управления



Рис. 7.7. Блочная структура схемы управления по нескольким осям

может обеспечивать перемещение по нескольким осям. Здесь требуется замена программ, дистанционное задание величин коррекции и различных параметров, что классическая система управления обеспечить не может.

§ 7.2. СТАНКИ И МАШИНЫ С ЧПУ

Станки и машины в процессе своего развития от ручного управления приводами оказались в настоящее время на том этапе, когда можно автоматически управлять приводом, а также заменять инструменты и объекты производства. Управляющая система обеспечивает общее управление работой станка посредством сигналов, которые задаются вручную, с перфоленты или от вычислительной машины. Системы ЧПУ различают в соответствии со способами составления и реализации программы перемещения исполнительных органов станка — в соответствии с принципом работы механизмов, осуществляющих данное перемещение. Системы числового программного управления могут иметь открытую (без обратной связи), замкнутую (с обратной связью) и адаптивную структуру. Управление движением по траектории может осуществляться путем задания координат и быть позиционным и контурным. Носителем программы может быть перфолента и магнитные носители.

С точки зрения управления движением по траектории наиболее простой системой ЧПУ является способ задания координат (рис. 7.8).

При этом способе управления исполнительный орган перемещается между двумя точками, в которых происходит технологическая обработка по более точно заданной траектории. Такая система управления применяется прежде всего у сверлильных и расточных станков.

У систем с прямоугольным управлением (рис. 7.9) исполнительный орган станка перемещается по двум (трем) заданным координатам. В отличие от способа задания координат перемещение между двумя точками точно определено и, как правило, связано с технологической обработкой. Такие системы применяются, например, у токарных станков.

Высшей ступенью управления траекторией перемещения является контурное управление (рис. 7.10). В этом случае исполнительный орган может перемещаться между двумя точками по заранее заданной траектории (скорости) перемещения. Системы контурного числового программного управления далее классифицируются по числу управляемых координат (2–5 осей).

Соединением функций прямоугольного и контурного управления характеризуются универсальные системы управления, предназначенные прежде всего для многоцелевых станков с ЧПУ. Их преимущество состоит в упрощении программирования при различных видах технологической обработки.

Представление о структуре устройства управления дает блок-схема металлорежущих станка с ЧПУ (рис. 7.11).

В настоящее время металлорежущие станки оснащаются системами управления типа CNC (рис. 7.12). Для внутренней структуры си-

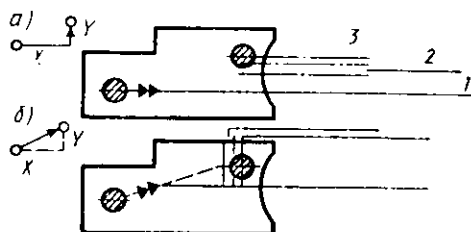


Рис. 7.8. Схема управления системой «Задание координат»

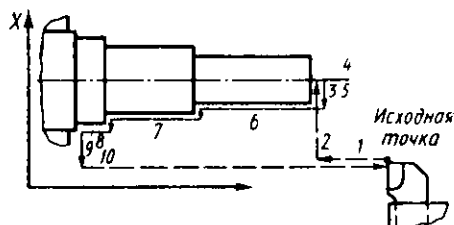


Рис. 7.9. Схема прямоугольного управления

--- быстрый ход; — рабочая подача

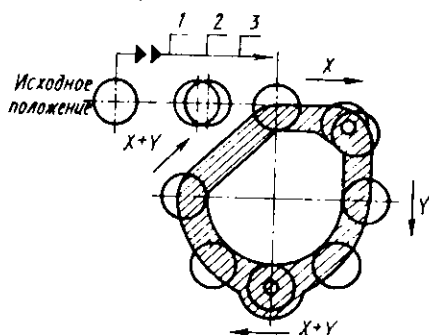


Рис. 7.10. Схема контурного управления

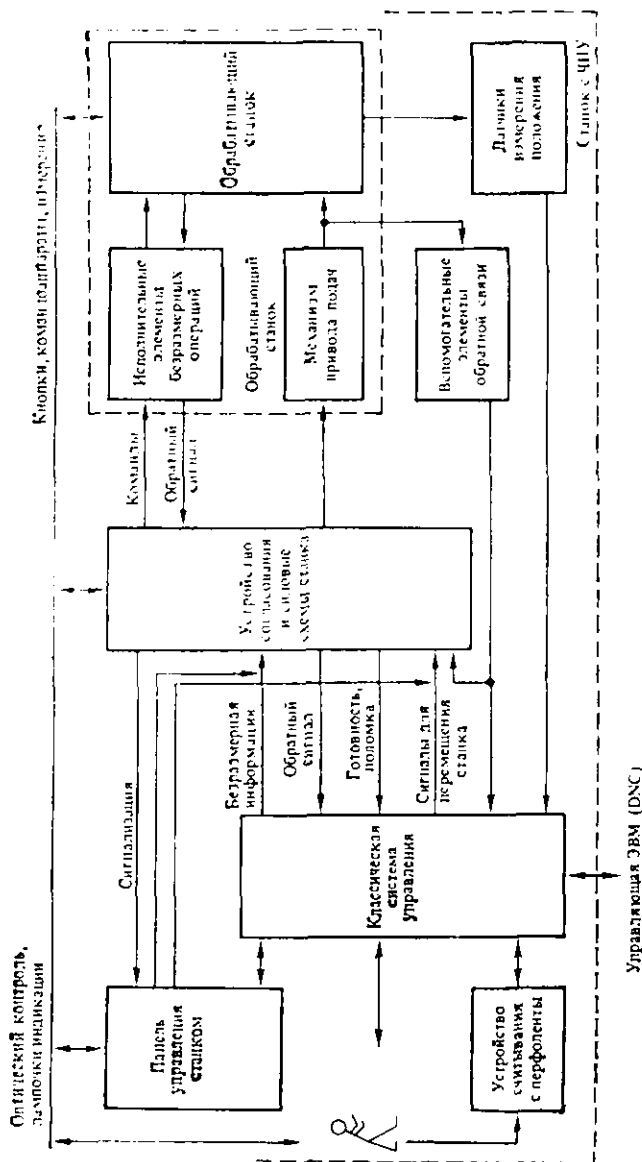


Рис. 7.11. Блок-схема обрабатывающего станка с ЧПУ

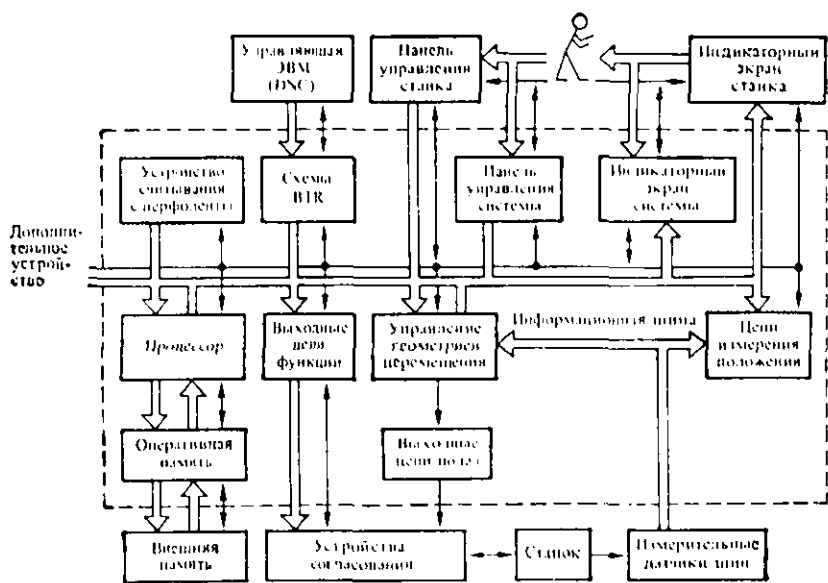


Рис. 7.12. Блок-схема системы управления CNC

системы CNC характерно наличие совокупности самостоятельных модулей, которые параллельно соединены с информационной шиной. Центральным устройством является процессор, который управляет потоком информации на информационной шине и большей частью ее также обрабатывает. В оперативной памяти, с одной стороны, записана системная программа (определяющая работу процессора, а следовательно, и всей системы), а с другой стороны — технологические программы обработки (подпрограммы). Для индикации данных у систем CNC применяются блоки отображения с электронно-лучевой трубкой или семисегментные дисплеи. Для ввода информации предназначена универсальная и специальная алфавитно-цифровая клавиатура. Технологические программы записываются на магнитную ленту или на гибкий диск. С точки зрения вычислительной производительности процессора наиболее трудоемко выполнение функций, связанных с управлением перемещения станка, т. е. интерполяцией, нарезанием резьбы, постоянной скоростью резания, адаптивным управлением, измерением и управлением привода. Непосредственно сам алгоритм не очень сложен, однако при требуемой точности, диапазоне скорости и программируемых значениях положения объем данных задач может превысить возможности процессора. По этой причине некоторые функции могут быть реализованы посредством отдельных блоков (интерполятор, блок измерения и управления перемещениями и т.д.). Для получения функций системы можно использовать несколько процессоров.

Такой вариант позволяет с экономической точки зрения реализовать микропроцессоры.

Системы типа DNC (Direct Numerical Control — прямое числовое управление), которые могут взаимодействовать в ЭВМ более высокого уровня управления, являются вариантами обычных систем. Так называемые схемы BTR (Behing Tape Reader—устройство считывания с перфоленты с запаздыванием) переключают входные сигналы на датчик или канал ЭВМ более высокого уровня управления.

Признаки современной конфигурации и функциональные возможности станков с ЧПУ. С точки зрения конструкции механической части станка с ЧПУ при ее разработке внимание уделяется прежде всего главному приводу и приводам подач, измерительному устройству и общей компоновке станка.

В отличие от «классических» станков главные приводы станков с ЧПУ более мощные. Применяются приводы со ступенчатым и бесступенчатым изменением частоты вращения. Главные приводы станков с ЧПУ со ступенчатым изменением частоты вращения, как правило, реализованы посредством передач, переключаемых муфтами (электромагнитными, зубчатыми или пластинчатыми) или с помощью передвижных зубчатых колес при применении двух- или трехступенчатого электродвигателя. Недостатком ступенчатого изменения частоты вращения является сложное задание экономичной скорости резания, а преимуществом — невысокая стоимость.

Бесступенчатое изменение частоты вращения главных приводов применяется прежде всего там, где у главного привода требуется функция фиксации шпинделя для смены инструмента или детали, а также позиционирования шпинделя при проведении внецентровых операций, например, на токарных станках. Достоинством бесступенчатого регулирования частоты вращения главных приводов является возможность задания оптимальной частоты вращения во всем объеме технологического процесса, а недостатком — высокая цена и потери по мощности двигателей.

Конструкции приводов подач имеют большое число возможных решений. Их конкретное решение зависит от способа управления и общей конструкции станка.

Позиционирование инструментов в замкнутой схеме управления станков с ЧПУ достигается путем сравнения запрограммированного положения с фактическим положением, которое фиксируется измерительными устройствами. Измерительные устройства работают по аналоговому или числовому принципу. При аналоговом принципе требуется подключение к системе числового управления через цифро-аналоговый преобразователь. В случае задания численных значений аналоговое преобразование полностью исключается.

При работе измерительных устройств различают задание величин в абсолютных значениях и в приращениях. При задании величин в приращениях определяется разность между идущими друг за другом положениями, а при задании величин в абсолютных значениях — расстоя-

ние от опорной точки. Способ задания величин в приращениях более прост, однако его недостаток состоит в меньшей точности при повторном позиционировании. Комбинацией обоих способов является циклическое задание величин в абсолютных значениях, где выходная информация является периодической функцией положения.

Измерительные устройства станков с ЧПУ разделяются по своему физическому принципу. Наиболее распространены:

1. Фотоэлектрические датчики, у которых используется принцип изменения интенсивности освещения фотоэлемента в зависимости от положения исполнительного органа станка с ЧПУ. Преимущество фотоэлектрических датчиков состоит в возможности бесконтактной работы, а также в возможности получения высоких рабочих скоростей.

2. Индуктивные датчики (индуктосины) осуществляют преобразование изменения положения в электрическое напряжение или ток. Линейный и вращательный индуктосины в принципе представляют собой измерительные трансформаторы с индуктивной связью и множественной обмоткой.

Для измерения угла поворота применяются сельсины. Они состоят из однофазного статора (первичная обмотка) и ротора (вторичная обмотка). Имеют разрешающую способность 5—10°. Кроме указанных измерительных датчиков существуют другие.

Числовое управление вносит изменения также в системы зажима инструментов. Основным требованием является унификация элементов крепления инструмента, позволяющая сокращать время крепления, а также обеспечивать строго определенное положение активной части инструмента. Наиболее часто инструменты крепятся с помощью унифицированных зажимных хвостовиков. Очень распространены конструкции, позволяющие переналаживать инструменты вне станка.

Новый составной элемент станков с ЧПУ — устройства для автоматической (по программе) смены инструментов. Станки с ЧПУ, оснащенные устройствами автоматической смены инструментов, называются *обрабатывающими центрами*. Обработывающим центром считается станок, который удовлетворяет следующим требованиям:

— не менее чем шестью автоматически заменяемыми инструментами обеспечивает технологическую обработку одного объекта;

— технологическая обработка проводится за один установ объекта, причем все перемещения и позиционирование проводятся в автоматическом цикле;

— манипуляция обрабатываемыми объектами осуществляется посредством технологических палет.

В зависимости от функционального упорядочения инструментального магазина различают четыре группы систем автоматической смены инструментов:

— смена инструментов из внешнего магазина с помощью механической руки;

— смена инструментов путем изменения положения инструментального магазина;

— смена инструментов из внешнего магазина через промежуточный магазин;

— комбинированная система.

Числовое управление наиболее широко применяется в области технологий обработки. Из общего числа станков с ЧПУ 96 % являются обрабатывающими. Применение числового управления — это основная тенденция развития обрабатывающих станков. Развитие происходит в направлении конструирования обрабатывающих станков с ЧПУ, которые могут работать в составе полностью автоматизированных систем, управляемых вычислительной машиной. Расширяется применение обрабатывающих центров с автоматической сменой инструмента.

Для работы в составе интегрированных автоматизированных производственных систем предназначены станки с ЧПУ и обрабатывающие центры, конструкция которых основывается на блочно-модульном принципе с возможностью присоединения к внешнему транспорту объектов, производственных принадлежностей, отвода стружки и прямого управления от ЭВМ.

В концепциях станков с ЧПУ и обрабатывающих центров отсутствует одноцелевой подход и сами они ориентируются на группы технологических функций, используемых для обработки партий деталей. Происходит развитие и производство основных элементов и узлов с возможностью составления из них унифицированных узлов.

Эти тенденции отражаются на компоновке станков с ЧПУ и обрабатывающих центров практически у всех изготовителей. У токарных станков стремятся повысить степень использования их производительности и фонда времени путем:

— применения двухшпиндельной компоновки станка для одновременной обработки двух одинаковых деталей;

— оснащения станка двумя самостоятельными суппортами для одновременной обработки одной детали двумя независимо управляемыми инструментами с применением ЧПУ по четырем осям;

— увеличения числа инструментов в револьверных головках;

— разработки токарных центров с автоматической сменой инструментов;

— конструктивной компоновки обрабатывающих центров таким образом, чтобы детали можно было обрабатывать за один установ.

Числовое управление находит применение не только в металлорежущих станках, но и в машинах другого назначения, позволяет получить положительный эффект в результате исключения дорогостоящих инструментов и приспособлений и снижения времени переналадки.

В области обработки давлением наиболее широкое применение нашли станки с ЧПУ для обработки листового металла (прошивка, вырубка и т. п.). Такие станки позволяют получать профили сложной формы без применения специальных инструментов с более высокой точностью и производительностью. У дыропробивных прессов с ЧПУ инструменты (около 30) находятся в поворотной инструментальной головке.

Для резки предназначены ножницы с числовым управлением. Они позволяют нарезать ленты любых размеров, причем длина заранее определяется программой. Устройство позиционирования может работать по одной или по двум осям. Ножницы с устройством ЧПУ, как правило, оснащены автоматическим штабелером. Для вырубki предназначены высечные ножницы с ЧПУ с инструментом, совершающим колебательное движение. Для управления перемещением инструмента, как правило, применяется контурная система управления. Ряд достоинств имеют гибочные прессы с ЧПУ. По программе определяются величина хода, установка упоров, последовательность изгибов. Время, связанное с переналадкой и манипуляциями, сокращается до минимума и все операции выполняются за один ход. Гибочные прессы могут работать совместно с вычислительной машиной, что существенно упрощает задачу изменения программ.

Большую группу машин с ЧПУ для обработки давлением составляют гибочные станки, позволяющие существенно повысить точность. Они оснащены автоматической системой обнаружения и исключения влияния обратного упругого воздействия. В практике появились клепальные машины с ЧПУ. Управление осуществляется по двум и более осям. В областиковки применение нашли прежде всего машины с ЧПУ для ротационнойковки ступенчатых и фасонных валов. Для изготовления из листового металла деталей типа тел вращения применяются токарно-давилые станки с ЧПУ. С применением программного управления можно проводить профилирование, закатку, вытяжку и другие операции.

Известны машины с ЧПУ для огневой резки, контактные сварочные машины, машины для сварки электронным лучом, машины для сварки лазером и машины для сварки электронной дугой.

Отрезные станки с ЧПУ работают с такой же системой, что и разметочные машины. Их достоинством является возможность бесступенчатого регулирования скорости и траектории резания, а также увеличение числа горелок для резки (10 и более). Повышение производительности достигает 100 %. Числовое управление часто применяется в комбинации с фотоэлектрическим управлением процесса резки по чертежу.

Машины с ЧПУ для точечной сварки применяются прежде всего в автомобильной промышленности. Перемещение по программе в пространстве сварочной головки обеспечивает высокую производительность при сварке без приспособлений даже сложных деталей. При сварке электронным лучом сварочная головка неподвижна, а свариваемая деталь перемещается, причем управление данным перемещением обеспечивается контурной системой ЧПУ по двум или трем осям. У станков с ЧПУ для дуговой электросварки, кроме управления траекторией движения сварочной головки, осуществляется программное управление значением напряжения и силой сварочного тока, скоростью подачи сварочной проволоки и расходом газа для получения защитной атмосферы.

Числовое управление начало применяться и у сборочных автоматов. Развитие здесь заключается в применении роботов при сборочных работах, а также в создании гибких автоматизированных линий с управлением от вычислительной машины.

Специфический вид технических средств с числовым программным управлением — оборудование для электронной промышленности. Речь, как правило, идет о специализированном оборудовании. Сюда относятся станки для производства печатных плат, сверления токопроводящих плат, обработки электрических кабелей и др.

Числовое управление широко применяется у контрольно-измерительных машин. К их достоинствам относится сокращение времени измерений (в среднем на 50—80%), устранение субъективных факторов, влияющих на точность измерения, универсальность применения и несложное обслуживание.

Подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ. Управляющая программа для станков с числовым программным управлением представляет собой совокупность полной, в численном виде выраженной информации, которая определяет перемещения рабочих органов станка с ЧПУ, их величину, направление и знак, определяет условия данных перемещений во время рабочего цикла, а также обеспечивает управление автоматической сменой инструмента. Управляющая информация делится на:

- геометрическую (описывает траекторию инструмента или объекта);
- технологическую (описывает технологические условия процесса);
- вспомогательную (обеспечивает, например, включение СОЖ, пуск шпинделя и т.п.).

Наиболее часто применяемым способом записи на магнитной ленте является импульсная и фазовая запись.

Для каждого станка, у которого предусматривается управление посредством программы, записанной на магнитной ленте, можно подготовить программу обычным способом на перфоленте и ее с помощью преобразователя перевести в магнитную запись. Чаще всего применяется восьмидорожечная перфолента, на которой информация записана в коде ETA RS 244 или коде ISO R 840. В коде ETA, который является семибитовым нечетным, применяются малые буквы, а в коде ISO, который также является семибитовым, но четным, применяются большие буквы.

Управляющая программа состоит из упорядоченного множества основных геометрических, технологических и вспомогательных информационных кадров. *Кадр* или *фраза* — эта группа слов, состоящая из адреса команды и ей соответствующего численного значения или только из численного значения. Адрес команды в случае размерной информации определяет ось, по которой должно происходить управляемое перемещение, а в случае информации без размеров определяет выполнение данного рабочего приема.

Для однозначного определения значения слов применяется установленная запись так называемый *формат кадра*, а именно:

--- формат кадра с фиксированной длиной (при данном способе численная информация не обозначается адресом, а ее значение определяется из установленной очередности);

--- формат кадра с переменной длиной (при данном способе для каждого рабочего приема станка посредством буквенного знака устанавливается адрес, который обозначает смысл численной информации независимо от числа слов в кадре; позволяет опускать не встречающиеся или не изменяющиеся слова).

Структура кадра представляет собой группу букв, цифр и специальных символов, записанных в особой последовательности. Буквенные знаки являются адресами и их значение приводится в табл. 7.1. Каждый кадр начинается с символа N - номера кадра, после которого следуют подготовительные функции, информация о размерах и информация без размеров. Кадр заканчивается специальным знаком «конец кадра». Структура кадра может быть, например, следующей: N3 G2 H2 X $\pm 3, 2$ Y $\pm 3,2$ F2 S2 T2 M2.

Таблица 7.1. Буквенные знаки для обозначения адресов, их смысл и пример применения

Адрес	Смысл	Пример
N	Номер кадра	N028
X, Y, Z U, V, W	Координаты осей управления	Z-042625
I, J	Положение центра дуги окружности относительно его начальной точки	I $\pm$ 004285 J—016432
B, F	Подача, быстрый ход	F04 — код E068400 — номер подачи
S	Частота вращения шпинделя	S08
T	Смена инструмента	T12
H	Коррекция размера (номер переключателя коррекции)	H06
G	Подготовительная функция	G87
M	Вспомогательная функция	M09

Программирование первых станков с ЧПУ проводилось вручную на основании сформулированных правил. Необходимость создания автоматизированных систем подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ вытекает из трудоемкости ручной подготовки и отладки программ.

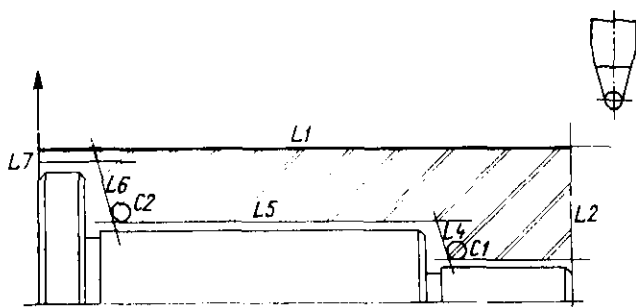


Рис. 7.13. Обработка тела вращения

```

CONI = CONTUR/
ZCLEAR/PL1
FROM/PL1,XLARGE
GOFWD/L1
GORGT/L2
GORGT/L3
GOFWD/C1
GOFWD/L4
GOLFT/L5
GOFWD/C2
GOFWD/L6
GOLFT/L7
GORGT/YLIN
TERCON
MACH1 = MIL/SO,DIAMET, 36,CUTFFD,10,SWATH,.5
REMARK MOTION STATEMENTS FOLLOK
COOLNT/FLOOD
SPINDL/700,CCLW
TURRET/1,0.5,5.820
FROM/STPT
ACT/MACH1
GO/TO,L1,TO,PL1,TO,L2
GOZIG/IN,CONI
GOSAFE/STPT
ACT/NOMORE

```

Рис. 7.14. Пример несложной программы на языке 2C, L для обработки тел вращения (см. рис. 7.13)

В общем случае создавались системы программирования, которые основывались:

- на индивидуальном подходе, при котором программы составлялись для определенных видов изделий и определенных типов металлорежущих станков при активном участии пользователя;

- на универсальном подходе, при котором программы составлялись таким образом, чтобы их можно было использовать для обработки любой детали. Такая группа языков программирования основывается на языках типа АРТ.

При разработке языков программирования для токарной обработки основывались на проверенных системах для фасонного фрезерования на базе АРТ.

Языки программирования в преобладающей мере

за исключением языка EXAPT и частично ADAPT, имели общий тип выхода, известный как CLTAPE или CLDATA (Cutter Location Data). Стандартным выходом для подготовки управляющих программ является АРТ 3 CLDATA. Он позволяет создавать общий

постпроцессор у нескольких систем программирования с общим входом APT 3 CLDATA.

Пример простой программы на языке 2C, L для обработки деталей типа тел вращения показан на рис. 7.13, 7.14.

§ 7.3. ГИБКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Существует целый ряд автоматически управляемых транспортных средств, отвечающих требованиям создания гибких транспортных систем. Транспортные средства, оснащенные автоматической подводящей и управляющей системой, могут материал, уложенный на палетах и в накопителях, транспортировать на заранее определенное место. Гибкие транспортные системы имеют самостоятельный привод и автоматическое управление каждой транспортной единицей.

Различают гибкие транспортные системы, находящиеся над полом, напольные и многоярусные. Управление может быть по траектории, координатным и комбинированным. Если рабочая зона обширна, а объекты транспортирования сильно рассеяны, то транспортную систему целесообразно создавать на базе транспортной сети (табл. 7.2). Концепция сети является основным интегрирующим фактором гибкого транспорта.

Транспортные системы в значительной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к гибкому потоку материала в процессе производства. Гибкость автоматизированного потока материала определяется указанной транспортной сетью.

Развитие характеризуется большим числом транспортных систем и конструкторских решений, нашедших свое применение. Системы, расположенные над полом, выполнены в виде подвесной дороги. Носители объектов подвешены на рельсе или наклонно на широких двойных направляющих. Несущий рельс с тоководущим кабелем и кабелем для передачи команд управления подвешен непосредственно к перекрытию цеха или на специальной опорной конструкции.

В случае напольных транспортных систем носители перемещаются по производственным площадям. Их применение выгодно там, где адресные цели следуют непосредственно друг за другом. Данные системы сверху хорошо обозримы и доступны. Для них требуются большие площади и более строгие меры безопасности. Перемещение осуществляется двумя способами. При первом способе используется установленный на полу и находящийся под электрическим напряжением направляющий рельс, посредством которого осуществляется направление и управление транспортной единицей. При втором способе используется принцип слежения «направляющего следа», который проходит под полом. В области гибких производственных систем внимание в последнее время сосредоточилось на втором способе. Создается системная структура транспорта с применением автоматически управляемых транспортных средств, так называемая система AGVS* (Auto-

* Автоматически управляемая транспортная система.

matic Guided Vehicle System). Система AGVS в гибкой производственной системе представляет собой ключевой элемент транспортировки и складирования и считается источником резервов в области инноваций. Констатируется, что промышленные роботы не обладают мобильностью системы AGVS, а конвейеры не имеют достаточной гибкости. Система автоматически управляемых транспортных средств является чрезвычайно гибкой системой (горизонтальный транспорт). Ее целесообразно применять при выполнении простых операций с небольшим числом конечных пунктов, а также использовать в сложных и централизованно управляемых транспортных процессах.

Представление о структуре системы AGVS дает рис. 7.15 Система имеет свой физический (носители функций) и информационный уровень. Информационный уровень представлен составляющими управления. Типичным примером являются транспортные средства с индуктивным управлением (рис. 7.16). Управление ими осуществляется посредством сигналов, поступающих от кабеля, проходящего под полом, и от магнитной индукции, действующей на систему управления транспортных средств. Недостаток данных транспортных средств заключается в том, что в случае обрыва кабеля происходит останов в работе всей системы, управляемой данным кабелем. К транспортным средствам, которые отслеживают обозначенную траекторию, относятся средства, отслеживающие магнитный флюоресцентный или белый «след» на поверхности пола. Недостатком оптической проводки (белая линия на полу) является необходимость обеспечения полной чистоты. Аналогичные ограничения действуют и в случае магнитной проводки, неисправности в которой могут возникать при попадании металлических частиц (например, стружки).

Более высокую ступень развития управления транспортными средствами представляют *визуально-наводящие системы*. Они более сложны, чем системы, в которых используются физические принципы наведения.

При управлении автоматическими тележками с визуальным наведением для целей ориентировки необходимо получить изображение рабочего участка в реальном масштабе времени так быстро, чтобы это отвечало скорости квантования сигналов для управляющих команд транспортного средства. Одним из путей является уплотнение данных, обработка визуальной информации с применением простых и надежных алгоритмов. В этих целях целесообразно применение линейных полей изображения. Они позволяют идентифицировать признаки управления и ориентировки, а также распознать контуры препятствий и управлять транспортным средством в реальном масштабе времени.

Сложность обработки изображения визуальными системами на базе полупроводниковых камер с «зарядной связью» CCD не позволяет получить необходимую скорость обработки информации об изображении. Линейное поле изображения состоит только из одного ряда из 256 светочувствительных элементов. Информация об изображении об-

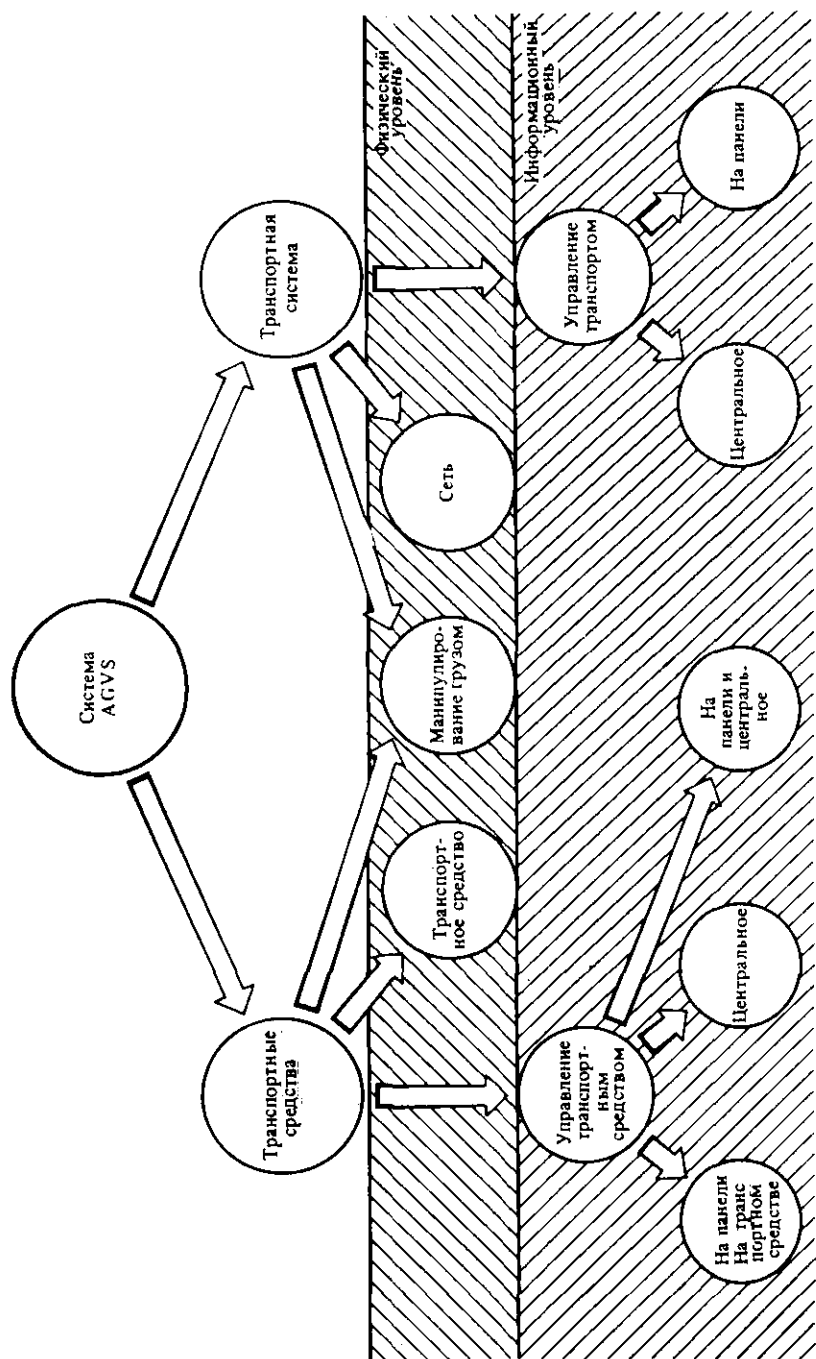


Рис. 7.15. Структура системы AGVS

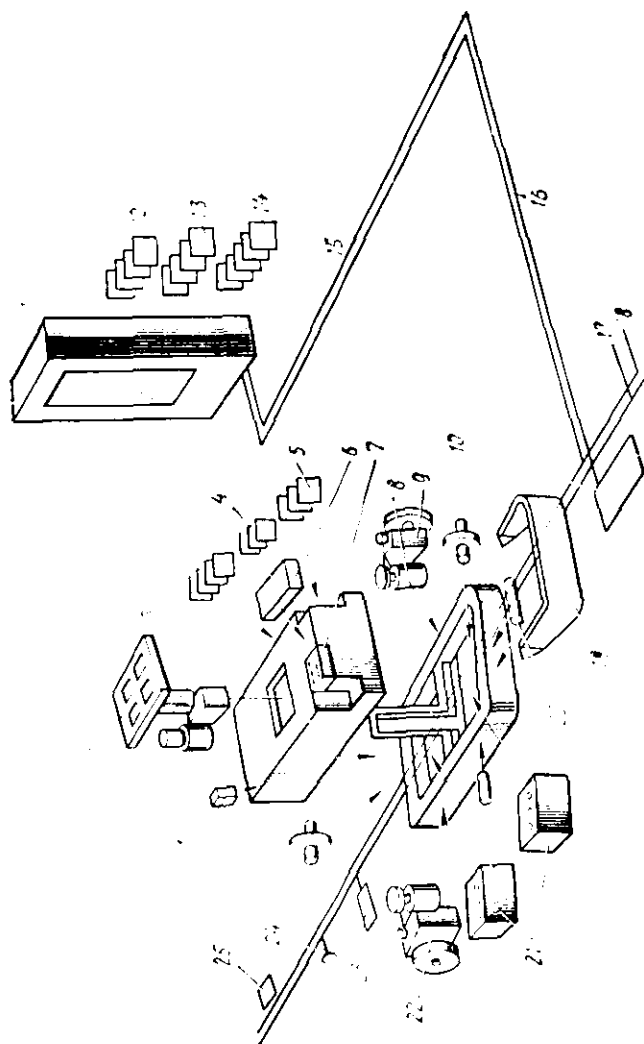


Рис. 7.16. Схема транспортного средства с индуктивным управлением:

1 — фотоэлектрический датчик; 2 — подъемное устройство; 3, 12 — микроЭВМ; 4, 13 — цепи регулирования; 5 — цепи передачи данных; 6 — силовые цепи; 7 — панель ручного управления; 8 — электродвигатель ведущего колеса; 9 — механизм управления левым колесом; 10 — передатчик данных; 11 — шкаф с устройством управления; 14 — генераторы путей и блокированной частоты; 15 — соединительный кабель уп. радиальных сигналов; 16 — соединительный кабель путей частоты; 17 — кабель управления; 18 — кабель путей частоты; 19 — датчик; 20 — обмотка устройства считывания данных; 21 — аккумулятор; 22 — правое ведущее колесо; 23 — сообщение о положении тележки (электромагнитный выключатель); 24 — опорная точка (адрес); 25 — датчики балансировки (электромагнит)

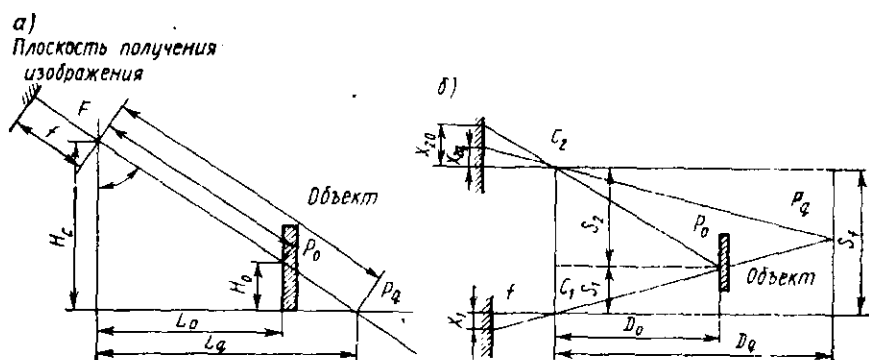


Рис. 7.17. Геометрия стереовидения для системы:
 а — вид спереди; б — вид сверху; F — фокус камеры

работывается в заданные промежутки времени, причем интервалы обработки могут сокращаться за счет объема информации.

Визуальная система должна обеспечивать идентификацию и установление места направляющей линии и препятствий, а также идентификацию знаков для ориентировки. Для идентификации и установления места направляющей линии и знаков ориентировки целесообразно также применение однорядного поля датчиков. Для надежного установления места препятствий необходимо объемное восприятие изображения. С этой целью применяются две камеры, которые в горизонтальном направлении удалены на небольшое расстояние S (рис. 7.17). Если в поле зрения камер не находится ни одного объекта, то в этом случае камера 1 видит на полу P_q . Если в поле зрения появится какой-либо объект, данный луч попадает на объект в точке P_o на высоте H_o . Камера 2 проводит идентификацию точек P_o , P_q разными лучами. Отдельные параметры видны из соотношений

$$\frac{s_1}{D_o} = \frac{x_1}{f}; \quad \frac{s_2}{D_o} = \frac{x_{2o}}{f}; \quad D_o = \frac{sf}{x_{2o}},$$

и так как $x_{2o} = x_1 + x_{2q}$, то выполняется

$$D_q = \frac{sf}{x_{2q}}; \quad D_o = \frac{x_{2q}}{x_{2o}} D_q.$$

Высота объекта определяется из соотношения

$$H_o = \frac{D_q - D_o}{D_q} H_c,$$

где H_c — высота расположения камер.

Расстояние объекта на уровне пола

$$L_o = \frac{D_o}{D_q} L_q.$$

Система автоматически управляемых транспортных средств имеет набор сенсорных датчиков. Применяются ультразвуковые датчики (индикация рули), фотосенсорные датчики (индикация груза, препятствий и т.п.). Передняя и задняя части транспортного средства имеют детекторы.

При управлении направлением движения автоматически управляемых транспортных средств используются различные принципы поворота. С целью обеспечения устойчивой статистической стабильности транспортного средства применяется трех- или четырехточечная опора. В случае использования четырехколесных транспортных средств ведущие колеса, как правило, tandemно расположены в направлении дви-

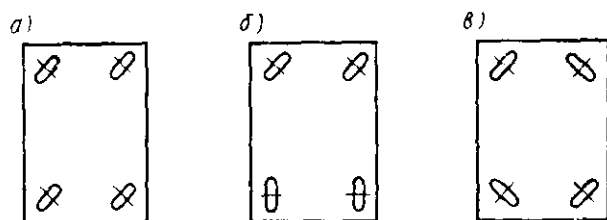


Рис. 7.18. Возможности поворота колес при применении принципа ODV при движении под углом (а), по дуге (б), при вращении (в)

жения, причем конструкция их подвески обеспечивает самопроизвольную установку в необходимом направлении движения, что достигается благодаря разной скорости вращения каждой из ведущих осей. Повышение маневренности достигается путем применения транспортного средства, действующего во всех направлениях — так называемый принцип ODV (Omni Directional Vehicle), которое обеспечивает три различные формы перемещения (рис. 7.18):

- наклонное перемещение или перпендикулярно главной оси транспортного средства путем одновременного поворота всех колес;
- движение по кривой в «автомобильном режиме», т. е. путем поворота передних колес;
- вращение на месте.

С целью установки и получения «местной» информации по траектории движения установлены знаки (например, магниты, отражатели и т.п.). Важная составная часть гибких транспортных систем — их системы управления. Комплектная система управления разделена на несколько уровней:

- подготовительная вычислительная машина — служит для подготовки программ;
- центральная управляющая вычислительная машина — управляет всем материальным потоком, а также обрабатывает данные транспортного процесса;

— стационарные устройства управления — управляют отдельными физическими элементами стационарного оборудования и транспортных средств;

— автономное управление транспортным средством (чаще всего от микропроцессора) — обеспечивает обработку информации для регулирования привода и направление транспортного средства.

С точки зрения функций, которые транспортная система должна выполнять, различают:

1. Системы, основной задачей которых является перемещение определенных материалов с одного места на другое, например со склада на рабочее место и обратно. При этом погрузку и выгрузку проводит вручную обслуживающий персонал склада или рабочего места или они могут проводиться автоматически. Характерным для транспортных систем является то, что транспортная сеть усложняется большим числом вариантов путей и большим числом адресов (конечных пунктов). Число транспортных средств относительно невелико. При управлении решается также вопрос оптимизации транспортных задач, например вопрос выбора кратчайшего пути к конечному пункту.

2. Системы, которые кроме выполнения функции транспортировки материала с одного места на другое являются составной частью рабочей ячейки. Рабочие операции проводятся непосредственно на транспортном средстве. Транспортное средство может иметь возможность проведения манипуляций объектом производства. В случае сборочных операций транспортное средство, кроме сборочной подгруппы, может одновременно перевозить и другие детали и соединительный материал.

Такие системы состоят из относительно большого числа транспортных средств, так как они заменяют конвейерные системы с непрерывным транспортом объектов производства. Транспортная сеть более про-

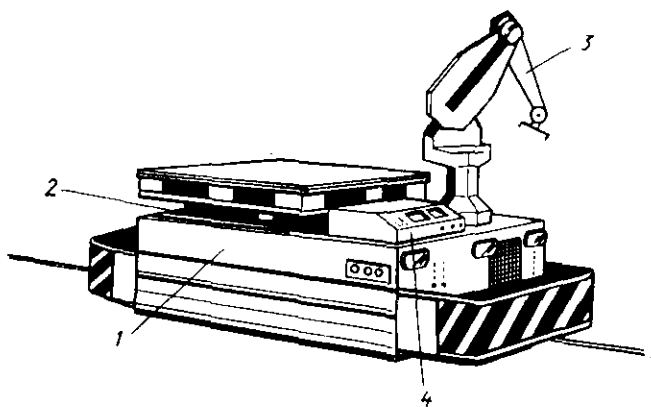


Рис. 7.19. Интегрированная система AGVS с роботом:

1 — тележка; 2 — поворотный стол; 3 — промышленный робот; 4 — система управления промышленным роботом

ста, расположение рабочих ячеек, направление движения и конфигурация транспортных путей подчиняются предметному принципу. Стоянки транспортных средств располагаются между группами рабочих ячеек.

Перспективным направлением дальнейшего развития систем AGVS является идея устанавливать роботы непосредственно на транспортном средстве (рис. 7.19).

Глава 8

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЯЧЕЙКИ И ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

§ 8.1. РЕКУРРЕНТНЫЙ ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТРУКТУР

В области системологии при формировании производственных ячеек и комплексов на передний план входит применение рекуррентного принципа. При данном принципе характерным является то, что структура основного уровня определяется как однородная и представляет собой модуль. Ближайшая единица более высокого уровня формируется на базе данного модуля путем добавления следующего модуля такого же или нового качества. Таким ступенчатым способом создается структура сложной системы с несколькими уровнями. Модули при структурном объединении могут представлять собой функциональные модели или материальные единицы. Они отображают функции, выполняемые в пространстве в реальном масштабе времени. Функции могут быть алгоритмизированы и обуславливают организационные связи.

В табл. 8.1 показано развитие структур производственной ячейки. Это построение начинается с объекта производства, который занимает первичное положение и может быть определен как одиночный объект или как группа объектов, сгруппированных по определенным правилам (принципы групповой технологии). С объекта производства начинает формироваться первый уровень тем, что здесь появляются технологические функции. Материальную модель данного уровня представляет модель СПИД (станок — приспособление — инструмент — деталь).

Ближайший более высокий уровень создается путем добавления манипуляционных функций. Материальная модель данного производства может представлять систему СПИД и промышленный робот или же их моделью может быть технологическое оборудование, работающее по принципу «безлюдной» технологии.

Таблица 8.1. Рекуррентный принцип построения производственной ячейки

М	О	Т	Р	Производственная ячейка
М	О	Т		Технологическая система с «безлюдной» технологией
	О	Т		Технологическая система
	О			Объект производства

Последний уровень в данной иерархии образуется в результате появления функций управления при реализации технологических и манипуляционных операторов, а также появления индикации состояния объектов производства. Подобный метод формализации и применения рекуррентного принципа позволяет создавать производственную ячейку как систему, которая имеет свою структуру и параметры.

Проблемы, которые возникают вследствие того, что используемое в единице оборудование в информационном отношении не является компактным, могут быть решены путем применения интерфейса. На уровне ячеек целесообразно создавать структуры собирающего типа. Такие структуры систем управления, а также использование интерфейса позволяют применять в системе функциональные единицы искусственного интеллекта.

Производственные комплексы более высокого уровня состоят из производственных единиц, которые связаны материальным потоком. С учетом технологических, манипуляционных функций, функций управления и материальных потоков происходит формирование информационных потоков. Управление при данной концепции возлагается на АСУ предприятия. Здесь применяются вычислительная машина и локальная сеть владельца (рис. 8.1). Структура таких систем основывается на распределенных потоках сигналов, их программировании и управлении.

Пространственная структура производственных систем должна всегда отвечать характеру производства. В соответствии с данным критерием различают три основных типа производственных систем:

1. *Фазовые* (дозировочные). Производственный процесс организован по технологическому подобию производственного оборудования. Оснащение отдельных рабочих ячеек производственным и манипуляционным оборудованием является универсальным, а структура ассортимента изделий постоянно изменяется. Применяется исключительно поток материала в виде производственных партий.

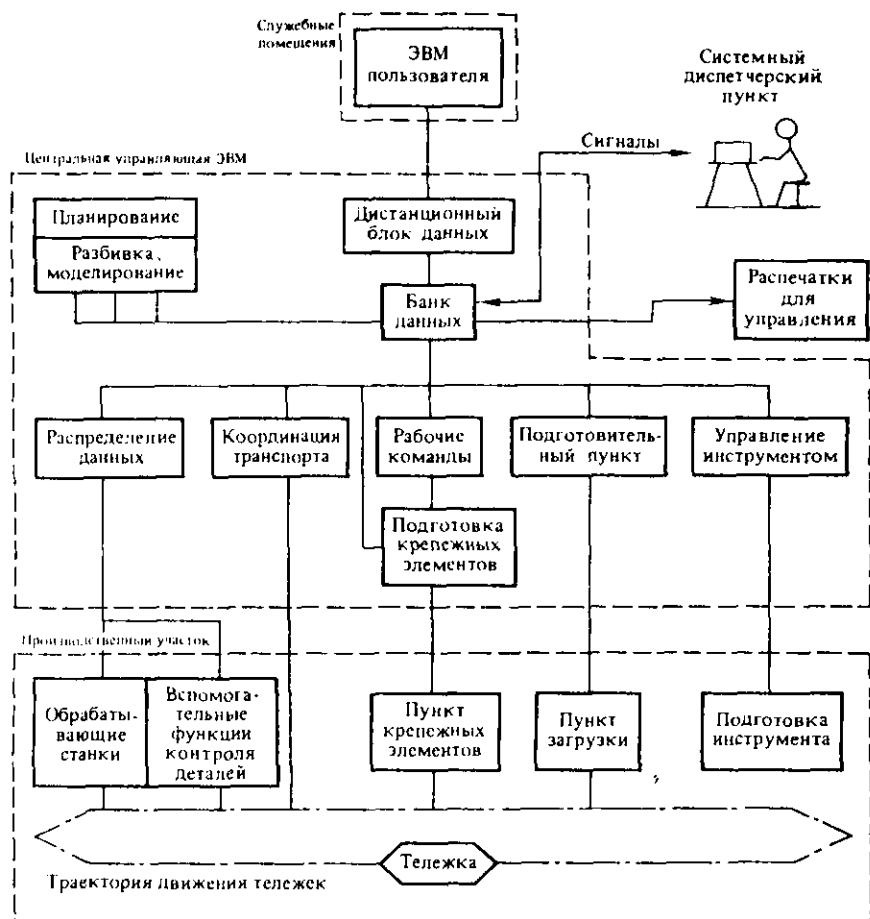


Рис. 8.1. Структура управления производственными группами

2. *Групповые*. Создаются группы деталей, сходных с точки зрения технологии производства, формы, размеров, массы и т. п. Отбираются также группы таких деталей, у которых такой же или сходной является последовательность технологических и манипуляционных операций.

3. *Поточные*. Характерный их признак — специализация на одном или нескольких видах изделий. Расположение рабочих ячеек отвечает технологическому потоку операций, работы в рабочих ячейках ритмично повторяются, за отдельными деталями жестко закреплены рабочие ячейки, а время ожидания в отдельных рабочих ячейках минимизируется.

Основное различие в решении производственных структур определяется типом производства. В массовом и крупносерийном производстве применяются линейные структуры производственных систем. В мелкосерийном и среднесерийном производстве производственные линии применять нецелесообразно, так как в ходе производственного процесса необходимо решать вопросы обработки различных объектов при изменяющейся последовательности операций. Время отдельных операций настолько разное, что не представляется возможным использовать единый управляемый цикл перехода объектов и подачи объектов на обрабатывающие станки. Управление производством может осуществляться в соответствии с потребностью. Структуры производственных систем отличаются прежде всего степенью комплексности, под которой понимается величина, которая отражает объем функций управления, степень их увязки друг с другом и с внешней средой, а также расходы, связанные с управлением системы.

Профилирование производственных систем базируется на анализе конструкторско-технологических и планово-организационных характеристик рассматриваемой продукции. Данные характеристики получают в результате классификации объектов производства, а также при проведении анализа трудоемкости изделий. Эти факторы определяют стабильность условий на технологических участках, характер перемещения материала в процессе производства и являются предпосылкой для объединения изготавливаемых деталей в группы.

Далее, при профилировании производственных систем исходят из того, что с точки зрения эффективного овладения функциями управления число обслуживаемых на одном производственном участке единиц оборудования не должно превышать 10—20. Размеры производственной группы дополнительно уточняются в соответствии с расчетами степени использования обрабатывающих станков и манипуляционного оборудования, а также с учетом производственных площадей.

При объединении в группы рабочих ячеек и единиц более высокого уровня (участков) необходимо учитывать и другие аспекты: равномерность количества единиц оборудования в рабочей ячейке и соблюдение норм управляемости.

Рабочие ячейки будут пропорционально разделены в том случае, если выполняется общее организационное условие:

$$\sum_{m=1}^{k_y} k_{dm} \approx c_y \cdot a,$$

где c_y — постоянная соразмерной величины рабочей ячейки (участка); k_y — число групп деталей, закрепленных за рабочей ячейкой (участком); a — коэффициент пропорциональности рабочих ячеек (участков).

§ 8.2. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ

Развитие автоматизации в значительной мере затрагивает и производство полуфабрикатов. Стимулирующим элементом здесь является малопринятая рабочая среда, угроза безопасности труда, а также всевозрастающие требования к качеству полуфабрикатов. Роботы все больше применяются в производстве полуфабрикатов в области технологий плоской и объемной обработки давлением, термобработки и литья. Там, где вводятся обязательные правила, запрещающие подставлять руку человека под пресс, роботизация обязательно должна применяться. Роботизация при производстве полуфабрикатов выдвигается на передний план благодаря относительной несложности обслуживания рабочих ячеек, а также возможности использования недорогих манипуляторов и промышленных роботов.

При плоской обработке давлением с применением промышленных роботов и манипуляторов наиболее выгодны операции, которые удовлетворяют следующим условиям:

- можно обрабатывать штучные полуфабрикаты;
- полуфабрикат имеет определенное исходное положение, а его форма и размеры обеспечивают безопасный захват и установку в рабочее положение;
- требуемую точность позиционирования могут обеспечить рабочее приспособление и инструмент;
- технологическая операция характеризуется необходимой серийностью производства;
- существуют взаимосвязанные технологические операции для создания автоматизированной линии.

Наибольшее применение при плоской обработке давлением нашли простые манипуляторы с пневматическим приводом и заданием рабочих положений посредством системы упоров. С учетом требуемого минимального времени, отводимого на операции манипулирования, предпочтение отдается двуплечим манипуляторам. В некоторых случаях целесообразно применять трех- и четырехплечие манипуляторы.

Активными органами промышленных роботов и манипуляторов для плоской обработки давлением, как правило, являются присасывающие захваты. В качестве типичного периферийного оборудования применяются: накопители вырезных полуфабрикатов (вход полуфабрикатов), поворотно-перемещающее устройство (для объединения двух рабочих ячеек), устройства для подачи металлических листов (вход), устройства для отвода вырезных полуфабрикатов, приспособление для резки листовых отходов, транспортеры и палеты.

Ввиду высокой степени детерминированности функции обслуживающего персонала машин для обработки давлением и более высокой степени дифференцирования операций данные робототехнические системы относятся в структурном отношении к наиболее простым и здесь широко применяется принцип их модульного построения.

- В качестве основных видов структуры систем можно выделить:
- основные одномашинные модули или рабочие ячейки;
 - пилотные ячейки;
 - линии обработки давлением;
 - гибкие системы обработки давлением.

Одномашинные модули (ячейки) с отдельным промышленным роботом или манипулятором базируются на компоновке типа «пресс—робот», причем варианты появляются в результате локализации входных и выходных периферийных устройств. Модификацией данных модулей с двумя прессами являются пилотные структуры рабочих ячеек. В результате последовательного соединения модулей возникают линии обработки давлением. Примеры модульной структуры систем плоской обработки давлением с отдельными промышленными роботами и манипуляторами приводятся на рис. 8.2.

Второй принцип создания основных модулей и линий обработки давлением основывается на применении прессов, работающих по принципу «безлюдной» технологии. В данном случае манипулятор объединен с машиной. Прессы соединяют в линию, как правило, с помощью конвейеров. Преимуществом робототехнических систем с прессами, работающими по принципу «безлюдной» технологии, является более высокая производительность вследствие минимизации траектории перемещений при манипуляции и идеального соответствия параметров пресса и манипулятора. Однако очевидно то, что применять данный способ роботизации невозможно без модернизации производства с существующими машинами.

Характерной особенностью роботизации в области объемной обработки давлением и термообработки является необходимость нагрева полуфабриката и относительно точное выдерживание температур при выполнении технологических операций. Это обуславливает необходимость проводить минимизацию времени операций манипулирования и автоматически контролировать температуру полуфабриката.

При рассмотрении вопроса целесообразности проведения роботизации на операциях объемной обработки давлением необходимо исключить те операции, во время которых происходит обработка пруткового или ленточного материала (калибровка, прокатка, фасонная прокатка и т. п.), операции, для проведения которых существуют специальные автоматы (радиальная ковка, раскатка роликами и дробеструйная обработка поверхности, резьбонакатывание и т. п.), и операции свободнойковки, требующие гибкого изменения технологических параметров (сила ударов и число ударов в зависимости от температуры и т. п.). В качестве приемлемых операций можно назвать обратное прессование, прямое совмещенное прессование, продольную фасонную прерывистую прокатку, ковку в штампах, плоскостную калибровку, резку, клеймение.

С учетом характера манипуляционных перемещений при объемной обработке давлением наиболее часто применяются роботы, которые работают в цилиндрической системе координат. Широко применяются

менять захваты с широким рабочим диапазоном или многозвенные. Конструкция захвата должна также обеспечивать быструю замену изношенных активных частей. Составной частью активной части робота является также устройство для смазки штампов.

В состав рабочих ячеек объемной обработки давлением и термообработки входит оборудование для нагрева объектов. С этой целью применяются полуавтоматические индукционные печи с автоматизированной подачей полуфабриката. Типичными периферийными устройствами роботизированных систем объемной обработки давлением (термообработки) являются накопители, обеспечивающие поштучную подачу полуфабрикатов, роликовые конвейеры, склизы, подающие устройства и палеты. Важным элементом являются сенсорные датчики для измерения температуры объектов. Прежде всего применяются бесконтактные оптические термовизионные датчики, причем они фиксируют превышение верхней или нижней границы температуры. На основании информации, поступающей от сенсорных датчиков, применяются решения о приемке или браковании полуфабриката.

Специфические признаки объемной обработки давлением ограничивают число вариантов компоновок робототехнических систем. В качестве первичной структуры можно считать роботизированную плотную трехмашинную систему (индукционная печь — пресс дляковки в штампах — пресс для обрезки) с соответствующим вспомогательным оборудованием. С целью повышения производительности систем целесообразно разделить функции между двумя роботами. Первый робот обеспечивает извлечение полуфабрикатов из печи и установку их в рабочую зону ковочного прессы. Второй робот обеспечивает снятие деталей с ковочного прессы, обслуживание обрезного прессы и отвод поковок. В результате объединения нескольких рабочих ячеек возникают роботизированные ковочные линии. Основным вариантом в принципе является групповое применение совокупности плотных ячеек без жесткой материальной и информационной связи. В системе используются организационные преимущества группового применения роботов.

Роботизированные системы термообработки в отличие от систем объемной обработки давлением имеют упрощенную конфигурацию. Основная структура представляет собой плотную ячейку со следующими главными компонентами: робот — индуктивная печь — охлаждающая ванна. Ввиду меньшей продолжительности цикла важной составляющей систем являются конвейеры для отвода деталей после термообработки.

Применение промышленных роботов для литья под давлением дает преимущества, связанные с равномерным использованием машин, стандартными условиями при извлечении отливок. Для литья под давлением в качестве технологического оборудования применяются электропечь с расплавленным материалом, машина для литья под давлением, резервуар с водой для охлаждения отливок, пресс для обрезки литниковых стояков, выходная палета или выходной конвейер.

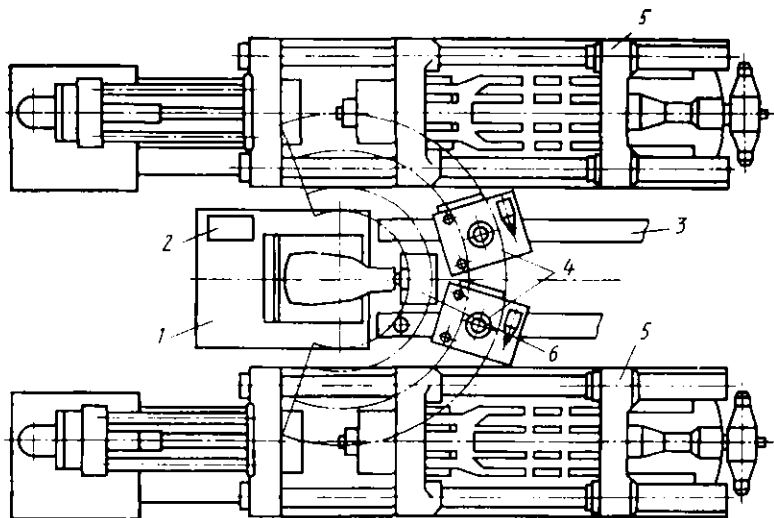


Рис. 8.3. Структура пилотной ячейки для литья под давлением:

1 - промышленный робот; 2 - система управления; 3 - конвейер; 4 - обрезной инструмент; 5 - машина для литья под давлением; 6 - охлаждение

Ввиду относительной несложности проводимых манипуляций при литье под давлением применяются автоматические манипуляторы. Их конструкция и параметры базируются на конструкции и параметрах соответствующих типов машин. Для снятия отливок и проведения других операций применяются, с одной стороны, манипуляторы, сконструированные с целью дополнительного оснащения машины для литья под давлением («безлюдная» технология), а с другой стороны — самостоятельные автоматические манипуляторы.

В области литья под давлением доминирующее положение занимают пилотные ячейки и объединения таких ячеек в виде крупных производственных комплексов со свободной связью между ячейками. На рис. 8.3 показана sdвоенная рабочая ячейка для литья под давлением алюминиевых деталей массой 50 кг. Промышленный робот обеспечивает снятие отливок с двух машин для литья под давлением, их охлаждение и установку на обрезной пресс. Детали выходят из системы на двух конвейерах периодического давления. Промышленный робот оснащен системой автоматического изменения программы в соответствии с типом обрабатываемых деталей.

§ 8.3. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Точечная сварка с применением роботов в большинстве случаев используется у листов глубокой вытяжки, толщина которых в пределах от $0,6 \pm 0,6$ мм до $1,0 \pm 1,0$ мм. Поверхность металлических листов часто упрочняют или наносят на нее цинковое покрытие.

Для таких листов по сравнению с «классическими» требуется более высокая мощность и более высокое прижимное усилие, чем те, которые имеют сварочные электроды. Требуется, чтобы сварные части листов имели такую форму, чтобы с помощью сварочных клещей можно было провести точечную сварку.

При получении прямых сварных соединений в удобных для доступа местах скорость точечной сварки должна составлять 60 точек/мин. В этом случае сварочные клещи должны быть рассчитаны на получение 3600 точек/ч. При сварке листовой стали толщиной $1,0 \pm 1,0$ мм со скоростью 60 точек/мин характерны следующие основные параметры: сварочный ток 10 000 А, время сварки 0,16 с. На основании данных параметров определяются размеры сварочных трансформаторов.

При точечной сварке прижимное усилие электродов сварочных клещей должно находиться в пределах 3,0—3,5 кН. Мощность сварочного трансформатора и его напряжение на вторичной обмотке зависят от полного сопротивления вторичной обмотки. На полное сопротивление вторичной обмотки влияет площадь сечения и длина применяемой проволоки, а также расстояние сварочных клещей от руки работника.

Робототехнические системы (чаще всего линии) точечной сварки в отличие от «классических» систем имеют ряд особенностей, вытекающих из характеристик объекта сварки, применяемой технологии сварки и принципиальных отличий основных технических средств, необходимых для создания роботизированных систем для точечной сварки.

При подготовке рабочих ячеек и линий к проведению точечной сварки с применением роботов исходят из подробного анализа изделий. Основной целью является спецификация и классификация деталей, из которых изделие сваривается. В автомобильной промышленности основные детали для точечной сварки целесообразно разделить (рис. 8.4) на следующие:

1. Некомпактные детали, которые включают в себя главные детали, к которым привариваются ребра жесткости меньших размеров (настил с туннельным усилением, детали для крепления поясов безопасности и т. п.), и отличающиеся по форме детали с одинаковым размером (передние части автомобилей, рамы, капоты, поперечины и т. п.).

2. Главные оборотные узлы и подгруппы, получаемые или глубокой вытяжкой, гибкой, или путем механического соединения (необработанные кузова, рамы, боковые детали, стойки для крепления крыши и сама крыша).

3. Сборочные узлы, которые появились в результате предварительной сборки или прихвата.

Аналогичным способом можно разделить и другие типы изделий, как, например, стальные рамы мебели и т. п.

При определении геометрии мест соединения важно определить опорные точки детали или сборочного узла. Опорные точки опреде-

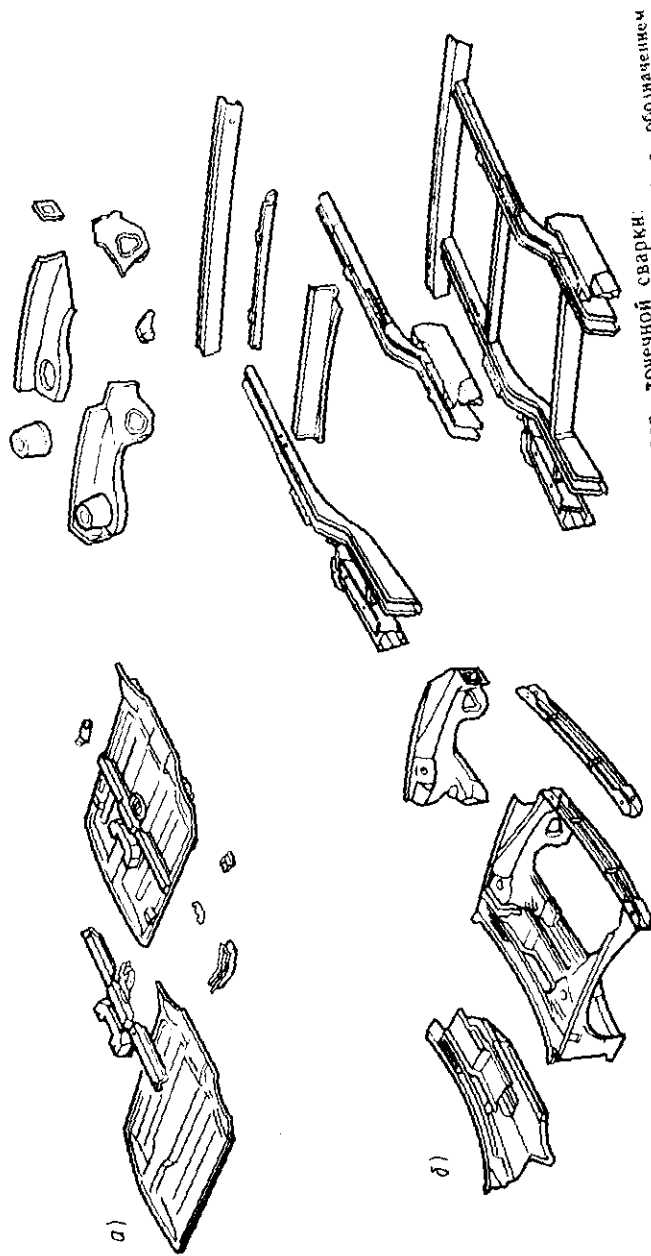


Рис. 8.4. Классификация основных деталей кузова автомобиля для точечной сварки.
 а — основные детали; б — различные по форме детали; в — основные сборочные группы и подгруппы с обозначением точек сварки

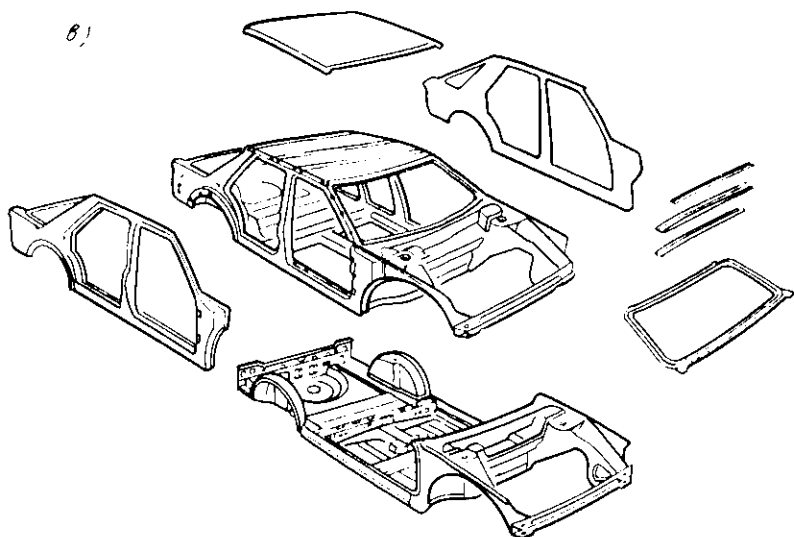


Рис. 8.4. (продолжение). Основные сборочные группы и подгруппы с обозначением точек сварки

ляют теоретическое положение детали или сборочного узла в системе координат X, Y, Z . Определение опорных точек при сборке является основным условием правильной сборки. В случае предварительно собранных узлов и подгрупп можно провести подробный анализ опорных точек до составления плана сварки. Анализ геометрических размеров и определение опорных точек проводятся в тесном взаимодействии с потребителем или потребитель может заранее определить опорные точки и их положение. При этом различают: а) главные опорные точки, которые должны сохраняться в течение всего процесса обработки деталей давлением (глубокой вытяжки); б) вторичные опорные точки, которые используются только при сборке деталей.

В качестве опорных точек используются механические элементы (неподвижные или подвижные направляющие штифты или клинья), которые приспособляются к будущему характеру соединения. Такая «опора» должна сохраняться на каждом этапе производственного цикла, включая случаи, когда деталь ухудшает доступ сварочных клещей к месту сварки. Это важно прежде всего при сборке большого числа небольших деталей (например, ребер жесткости) на основную деталь, где доступ сварочным клещам робота может быть очень затруднен.

С целью длительного сохранения точности деталей используются приспособления. Приспособления предназначены для переналадки инструментов во время производства, для контроля соблюдения формы свариваемых деталей и для технического обслуживания инструментов.

При определении точек сварки руководствуются требованиями потребителя. В общем случае потребитель указывает число и положение точек сварки, а также определяет требования к их качеству. Требования вытекают из предварительно выполненного анализа, научно-исследовательских работ, проводимых на изделии, и т. п. На этапе определения точек сварки проводится:

- определение точек прихватки (для участка прихватки требуется составить план расположения и определить число точек сварки для получения геометрии прихватываемой детали; одновременно должна быть проверена возможность доступа сварочных клещей робота к точкам сварки по отношению к опорным элементам);

- разработка рабочего процесса, в рамках которого определяется последовательность сборки отдельных деталей сварного узла таким образом, чтобы были сварены все точки;

- объединение точек сварки с целью реализации максимального числа точек сварки посредством одного робота, при этом определяется основное время операций, важное для получения совокупностей точек в соответствии с их положением на детали;

выбор сварочных клещей осуществляется на основании проведенного анализа; определяются их число и форма, необходимая для получения отдельных точек или групп точек.

При определении длительности цикла исходят из характера производства и возможностей сварочных машин. После оценки времени манипулирования и времени сварки появляется возможность определить число точек, в которых может быть проведена сварка за один цикл одним роботом. Этим определяется возможность оптимизации числа роботов, входящих в состав линии.

Необходимая гибкость сварочной линии определяется посредством фактической или возможной степени приспособления линии к рассматриваемому производству различных объектов. На степень гибкости линии влияют рабочие инструменты, от которых требуется хорошая приспособляемость к изготовлению различных изделий. Сварочные посты и линии могут быть жесткими (рассчитанными на сварку одного изделия), частично гибкими (с возможностью переналадки на сходные изделия), гибкими (рассчитанными на сварку нескольких вариантов изделий).

С целью увеличения гибкости сварочных линий чаще всего используется несколько решений. В случае поломки следующий робот принимает на себя выполнение функций робота, вышедшего из строя. Необходима также возможность замены сварочных клещей и сопоставимые производительности роботов. Запасные роботы могут располагаться в конце линии. Это позволяет передать функции вышедшего из строя робота другому роботу без потерь времени. Применяется также разделение сварочной линии на последовательно работающие участки с межоперационными складами или на параллельные участки, которые обеспечивают параллельную работу.

Управление технологическими процессами точечной контактной сварки у роботизированной рабочей ячейки является технической проблемой, связанной с идентификацией параметров процесса сварки, параметров сварочных клещей, управлением силовыми тиристорами и взаимодействием с системой управления сварочного робота.

В случае управления сварочной линией данная проблематика более сложна. Управляющая система управляет процессом сварки посредством ряда сварочных клещей, работа которых, включая переключение тока, может случайно взаимно перекрываться. Далее, система управления обеспечивает синхронизацию работы всех сварочных роботов, пуск программы, ее прерывание и возможную остановку, осуществляет контрольно-блокировочные функции с точки зрения безопасности технических средств и обслуживающего персонала и проводит диагностику для выявления ошибочных сварных швов и поломок оборудования. Кроме того, система управления позволяет программировать оборудование, задавать технологические параметры, выполнять контрольные функции программы и проводить идентификацию производственно-экономических данных о количестве сварных швов, изделий, ошибочных сварных швов и т. п.

Технологическим инструментом процессов точечной контактной сварки являются сварочные клещи. На разработку конструкции сварочных клещей влияют многие факторы, из которых наиболее важны следующие: геометрическая форма свариваемых деталей, тип промышленного робота и требования пользователя. Наиболее часто применяются клещи типа «И» и типа «С». Типоразмер сварочных клещей определяют на основании геометрической формы свариваемых деталей и числа точек сварки. Различают сварочные клещи для подвода сварочных электродов с большой массой. На конструкцию сварочных клещей в значительной мере влияет местоположение сварочного трансформатора (рис. 8.5).

Сварочные клещи с подвесным трансформатором, перемещающимся по конструкции системы, соединены со сварочным трансформатором посредством провода вторичной обмотки, причем его длина не ограничивает перемещения робота. Управление сварочными клещами осуществляется от пневмо- или гидроцилиндра. Недостатком здесь является то, что жесткость провода оказывает неблагоприятное воздействие на манипуляционные возможности робота, а также повышает величину действующих сил. Повторяющиеся броски тока приводят к снижению надежности и срока службы робота. Низким является также срок службы тех проводов, которые подвергаются нагружению при механическом перемещении робота.

Сварочные клещи со сварочным трансформатором, расположенным на руке или встроенным в руку робота, более выгодны, однако они применяются только у некоторых типов роботов. Длина проводов, отходящих от вторичной обмотки, значительно короче, а сами они более жестки. Недостаток при этом состоит в том, что масса трансформатора ограничивает скорость перемещения руки робота. В случае

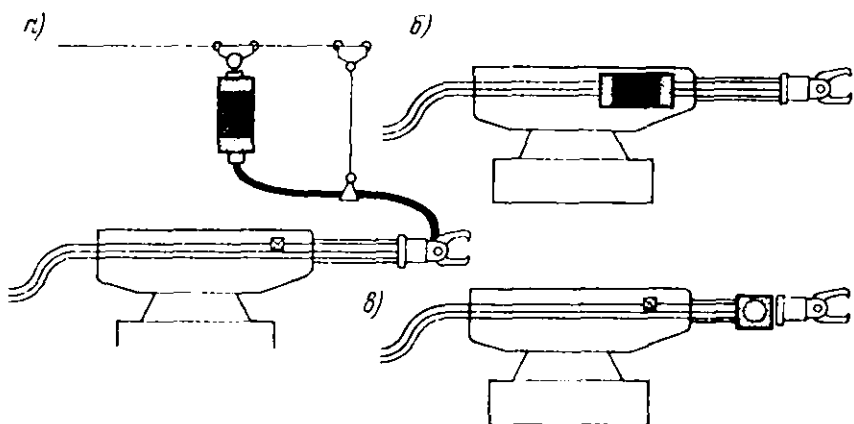


Рис. 8.5. Сварочные клещи с трансформатором подвесным (а), в корпусе робота (б), встроенным (в)

установки сварочного трансформатора на другой оси перемещения происходит увеличение длины проводов вторичной обмотки. Используются также решения, при которых трансформатор является противовесом сварочных клещей, а также решения, при которых трансформатор встроен в руку, а провода проходят внутри руки. Недостатком является усиление помех.

Сварочные клещи, объединенные со сварочным трансформатором, обладают тем достоинством, что при такой конструкции отсутствует потребность в толстых, тяжелых, жестких проводах, отходящих от вторичной обмотки трансформатора, которые обуславливают электродинамические удары. В конструкциях используются провода, отходящие от первичной обмотки трансформатора, которые являются более гибкими и имеют меньшую площадь сечения. Снижение величины полного сопротивления вторичной обмотки приводит к уменьшению размеров сварочного трансформатора. Недостатком данного решения являются большие размеры сварочных клещей и затрудненный доступ к местам сварки. К существенному увеличению массы, кроме статического нагружения руки, приводит более высокий крутящий момент.

В системах межоперационного манипулирования и транспорта сварных деталей роботизированных систем и линий сварки применяются транспортные средства и способы транспортировки, аналогичные применяющимся в других системах. Достоинством роликовых транспортеров или тележек с низкой платформой является высокая степень использования, недостатком — низкая скорость транспортировки. Конвейеры целесообразно применять в случае различных типов свариваемых деталей или групп деталей, геометрическая форма и размеры которых должны соблюдаться в течение всего производственного цикла. Автоматически проводимые тележки полностью независимы, имеют возможность гибкого управления и манипулирования

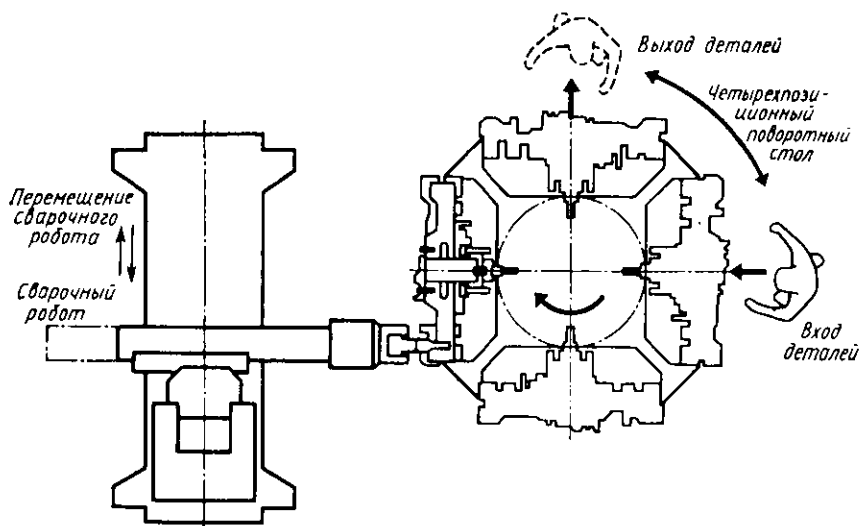


Рис. 8.6. Структура роботизированной производственной системы для точечной сварки

детальями, находящимися на палетах, и т. п. Детали между отдельными сварочными постами могут перемещаться роботом-манипулятором. Данный способ манипулирования ограничен массой и размерами деталей. Необходимо, чтобы соединяемые детали были уже заранее прихвачены, так как приспособления для установки и позиционирования деталей ввиду их массы использовать не представляется возможным.

Длительное соблюдение точности свариваемых деталей при межоперационном транспорте и самой точечной сварке обеспечивается посредством позиционирующих приспособлений. Последние специально конструируются под соответствующие типы свариваемых деталей, для ухода за инструментом и т. п.

В методическом отношении способ выбора робота для точечной сварки основывается на подробном анализе основных критериев, в качестве которых рассматриваются положение свариваемых деталей, транспорт деталей и геометрические критерии.

Роботы для точечной сварки должны иметь грузоподъемность не менее 0,4–0,5 кН, в особых случаях — более 1,0 кН. Расстояние между центром тяжести и местом действия прижимной силы электродов сварочных клещей должно быть максимальным. Оптимальная нагрузка на шарнирное соединение сварочных клещей с рукой робота при действии крутящего момента составляет около 120–140 Н·м. Максимальная скорость перемещения вдоль оси составляет примерно 0,5–1,5 м/с, а скорость вращения относительно оси — примерно 60–180°/с. Повторная точность позиционирования в той же точке составляет $\pm 0,5$ –1,0 мм.

С точки зрения возможности применения промышленных роботов в технологических процессах точечной сварки различают следующие компоновки роботизированных производственных систем:

— производственные системы, в которых промышленный робот обслуживает специальную сварочную машину или оборудование. Сварочная машина предназначена для точечной сварки небольшого числа изделий. Промышленный робот устанавливает объект на сварочную машину и его снимает после проведения технологической операции;

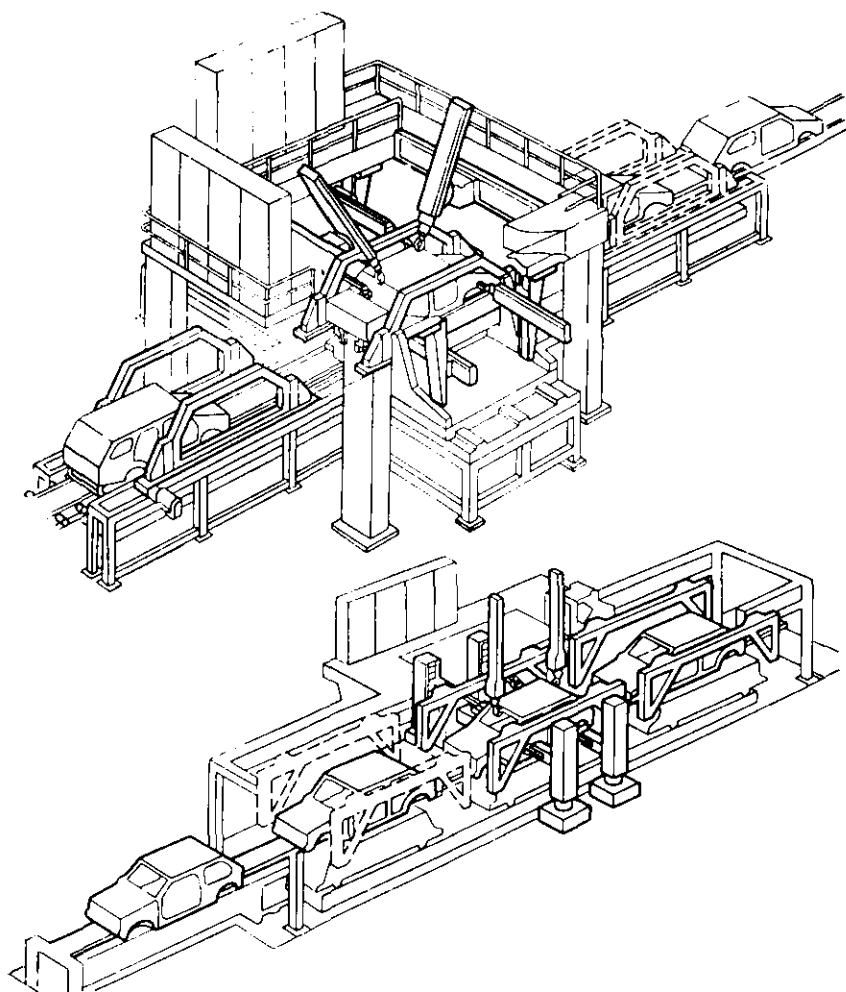


Рис. 8.7. Структура сварочных постов роботизированных производственных линий для сварки деталей кузовов автомобилей

— производственные системы, в которых промышленный робот проводит точечную сварку у объекта, установленного на многопозиционном поворотном столе или в приспособлении;

— производственные линии, в которых промышленные роботы производят точечную сварку у объекта, шагами перемещаемых транспортной системой.

Пример типовой структуры роботизированной производственной системы для точечной сварки со сварочным роботом и четырехпозиционным поворотным столом приводится на рис. 8.6. Промышленный робот «Сайк», оснащенный ходовой частью с шестью степенями свободы, обеспечивает получение 21 точечного сварного шва у деталей, закрепленных в установочном приспособлении на позиционирующем столе. Детали устанавливаются и снимаются вручную. Максимальная производительность системы составляет 80 объектов в час.

На рис. 8.7 приводятся примеры компоновки сварочных постов, которые являются составной частью роботизированных производственных линий для сварки деталей автомобильных кузовов.

§ 8.4. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРОСВАРКИ

Дуговая электросварка в защитной атмосфере с точки зрения своей технологии и конструктивного решения технологического активного органа предназначена для использования в роботизированных системах. Такая электросварка становится в настоящее время одной из наиболее распространенных областей применения промышленных роботов.

Классификация основных методов дуговой электросварки в защитной атмосфере приводится на рис. 8.8. Реализация данных методов обусловлена тем, что технологический активный орган робота должен с достаточной точностью ориентироваться по отношению к свариваемому объекту.

Точность пространственной ориентации исходной точки сварки, пространственное перемещение технологического активного органа, геометрические и временные факторы в наибольшей мере влияют на качество сварного шва, которое характеризуется пространственным расположением сварного шва, его геометрией и металлургической чистотой. Основные перемещения технологического активного органа промышленного робота, которые требуются при технологии дуговой электросварки, в функциональном отношении зависят от места сварки, вида сварного шва и способа его получения. Произвольную форму сварного шва можно получить путем наплавки валиков (рис. 8.9).

Основной проблемой в области роботизации технологии дуговой электросварки является точное определение геометрического положения начальной точки сварки. Наибольшее влияние на возможность коррекции теоретической начальной точки с целью приближения ее к фактической точке, положение которой изменяется вследствие существования суммы производственных допусков отдельных частей

свариваемого объекта, оказывает система управления робота. Требуется система, которая обеспечивает оценку реального положения свариваемого объекта и технологического активного органа робота. В технологических процессах дуговой электросварки в защитной атмосфере должны применяться промышленные роботы с адаптивной системой управления. Требования к адаптивности сварочных роботов можно разделить на две группы:

1. Адаптируемость к положению — система управления обрабатывает пространственные координаты взаимного положения места сварки и острого электрода. Функции данного типа являются геометрическими и определяются переменными (X_i , Y_i , Z_i , t_i — время). Изменения положения острого электрода у сварочного робота происходят под действием системы перемещения робота.

2. Адаптируемость к процессу, которая касается размеров и геометрии сварочной ванны, которая, в свою очередь, изменяется и приспособ-

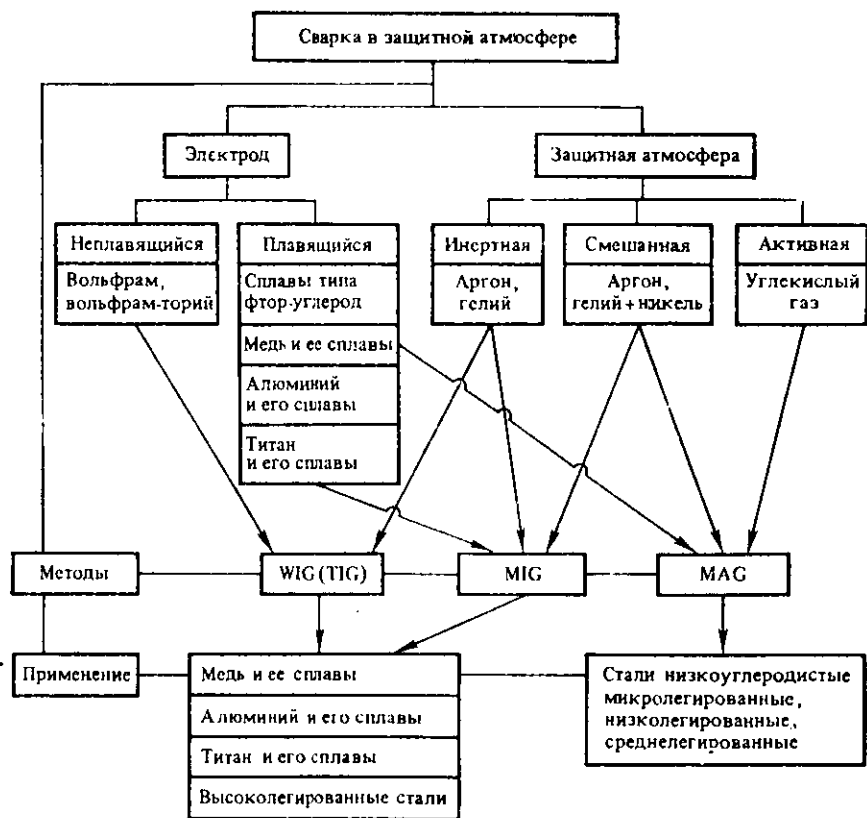


Рис. 8.8. Классификация основных методов дуговой сварки в защитной атмосфере

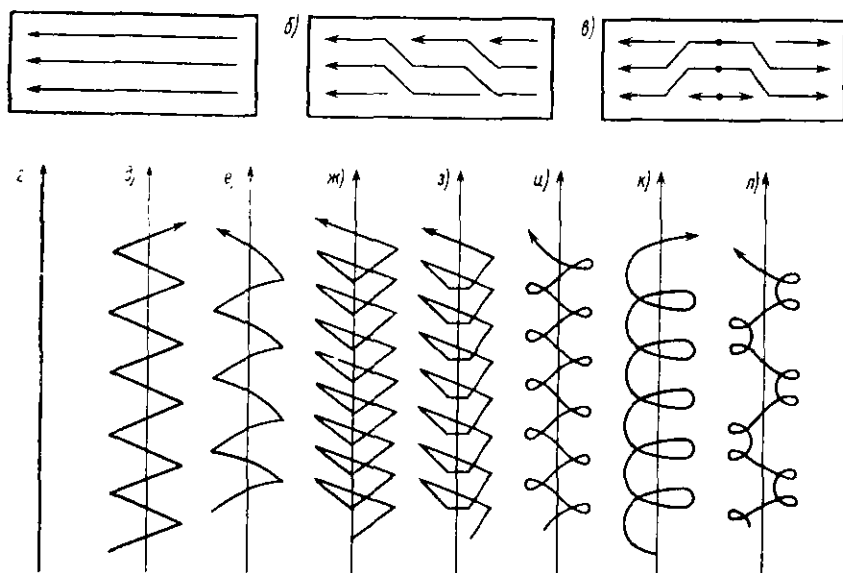


Рис. 8.9. Получение сварных швов:

а—в — ориентация при получении многослойных сварных швов; г—л — схемы рабочих перемещений электродов

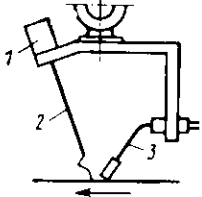
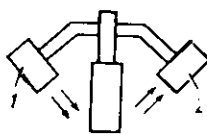
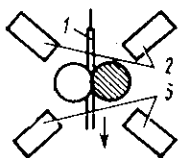
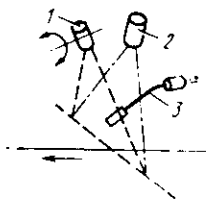
сабливается к геометрии сварного шва в данном месте и определяется равновесным состоянием между массой и количеством теплоты. Данное равновесное состояние нарушается при изменении размеров сварного шва, изменении условий отвода теплоты и т. п.

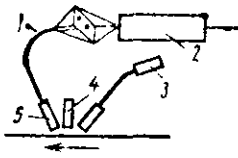
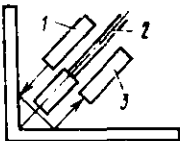
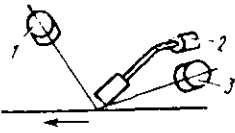
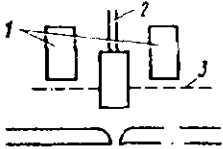
В настоящее время приоритет отдается решению вопроса гибкости положения, обеспечить которую чрезвычайно сложно. Вопрос адаптируемости к процессу решается путем стабилизации параметров сварки.

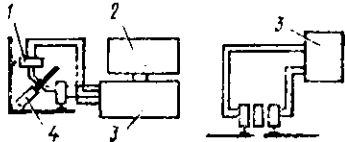
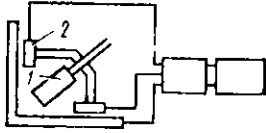
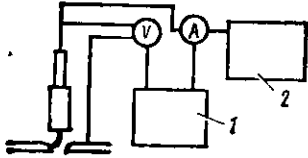
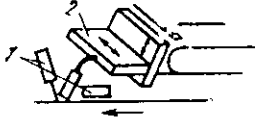
При решении вопроса обеспечения адаптируемости к положению требуется, чтобы сварочные роботы были оснащены сенсорными системами. Перечень сенсорных систем для обеспечения адаптируемости к положению приводится в табл. 8.2.

Принцип адаптируемости к положению можно объяснить на примере работы АРС сенсорного датчика. Функция сенсора заключается в том, чтобы идентифицировать электродугу генерированное положение во время процесса сварки, вследствие чего можно корректировать положение сварочной горелки. Сенсор следит за формой сварного шва во время сварки. Принцип управления положением в направлении оси Y виден на рис. 8.10. Горелка при сварке отклоняется вправо и влево относительно кривой сварки. Сила тока при отклонении вправо и тока при отклонении влево является разной. После коррекции положения горелки сила данного тока равна нулю, а положение горелки по отношению к кривой сварки является иным. При управлении по-

Таблица 8.2. Примеры наиболее часто применяемых сенсорных систем дуговой сварки

Тип сенсорной системы	Схема
Тактильные сенсоры оснащены контактным наконечником, который контролирует траекторию сварного шва. Механическое отклонение преобразуется в электрическое напряжение	 1 — тактильный датчик; 2 — контактный наконечник; 3 — горелка
Оптические сенсоры с одним передающим и одним приемным устройством работают на принципе измерения отраженной энергии или на принципе изменения фазы колебаний при переходе через ребро поверхности отражения	 1 — передающее устройство; 2 — приемное устройство
Оптические сенсоры с двумя передающими и двумя приемными устройствами. Каждая головка направляет модулированный свет разной частоты. На основании количества отраженной энергии сенсоры различают величину отклонения	 1 — горелка; 2 — приемное устройство; 3 — передающее устройство
Оптические сенсоры с периодическим оптическим сигналом и приемным устройством непрерывного действия. Передающее устройство совершает колебательное движение, которое прерывает оптический сигнал. В приемном устройстве получается ряд точек разной светимости	 1 — передающее устройство; 2 — приемное устройство; 3 — горелка

Тип сенсорной системы	Схема
Оптические сенсоры с оптическим кабелем дискретизируют отраженное изображение траектории сварки. Сигнал попадает в поле фототранзисторов, формирует изображение, которое обрабатывается	 1 — оптический кабель; 2 — декодер; 3 — горелка; 4 — передающее устройство; 5 — приемное устройство
Оптические сенсоры для получения угловых сварных швов. Передаваемая энергия отражается от стенок и попадает в приемное устройство. Отклонение от траектории индицируется исчезновением сигнала от передающего устройства	 1 — передающее устройство; 2 — приемное устройство; 3 — горелка
Ультразвуковые сенсоры имеют отдельную передающую и принимающую часть, а их расположение является таким же, как у оптических сенсоров	 1 — передающее устройство; 2 — горелка; 3 — приемное устройство
Сенсорные системы обрабатывают инфракрасное излучение, идущее от материала, и пригодны, прежде всего, для контроля многослойных сварных швов	 1 — датчик; 2 — горелка; 3 — диафрагма

Тип сенсорной системы	Схема
Индукционные сенсоры применяются для контроля отклонения и используют принцип изменения индуктивности под действием ферромагнитного материала	 1 — датчик; 2 — измеритель; 3 — осциллограф; 4 — горелка
Емкостные сенсоры работают на том же принципе, что и индукционные. Пластишка сенсора и свариваемый материал образуют конденсатор, емкость которого изменяется в зависимости от расстояния	 1 — горелка; 2 — датчик
Сенсорные системы получают информацию непосредственно от электрической дуги. Считываются два основных параметра: ток и напряжение	 1 — устройство управления; 2 — источник сварочного тока
Модули управления адаптивностью по положению целесообразно применять у роботов с высокой грузоподъемностью. Адаптивная система обеспечивает управление по двум осям перемещения горелки с точки зрения выявленных отклонений. Применяются различные типы сенсоров	 1 — датчик; 2 — модуль

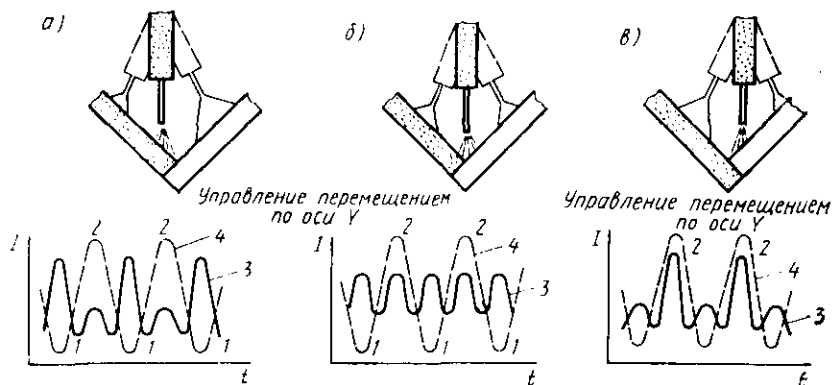


Рис. 8.10. Принцип управления положением электрода в направлении оси Y :
 а — отклонение от положения влево; б — центр после коррекции; в — отклонение от положения вправо; 1 — левая сторона; 2 — правая сторона; 3 — ток; 4 — положение электрода; t — ток; t — время

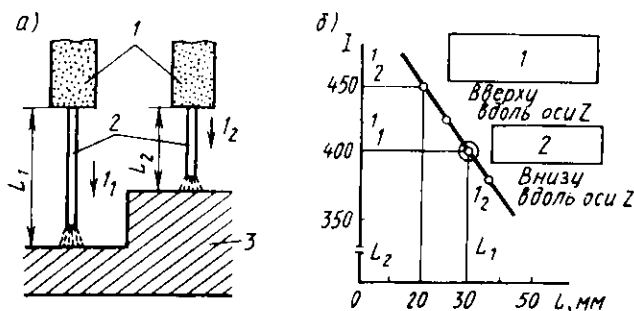


Рис. 8.11. Принцип управления электродом в направлении оси Z :
 а — схема расположения электродов; б — график зависимости тока I — дуги от длины электрода L , мм; 1 — сварочная головка; 2 — электрод (сварочная проволока); 3 — основной материал

положением в направлении оси Z (рис. 8.11) используется то свойство дуги, что изменение тока дуги пропорционально изменению расстояния между горелкой и основным металлом, а управление высотой горелки осуществляется таким образом, чтобы был получен требуемый ток.

Определение условий дуговой электросварки тесно связано с работой сенсора. Чаще всего условия дуговой электросварки, т. е. защитная атмосфера, сварочная проволока, форма сварного шва, сварочный ток, напряжение, скорость сварки, амплитуда и частота отклонений, а также положение и угол наклона горелки, определяются методом взаимодействия посредством CRT-дисплея системы управления. Оператор работает с системой управления через клавиатуру, причем ответы получают на CRT-дисплее. Система управления автоматически генерирует условия сварки.

Большинство систем управления сварочных роботов состоит из микропроцессоров или микроЭВМ, дополненных системой периферийных устройств (устройство ручного программирования, алфавитно-цифровой или графический терминал, клавиатура, печатающее устройство и т. п.). Оператор с помощью этих средств может изменять условия сварки в реальном масштабе времени или осуществлять их тонкую регулировку во время сварки без прерывания работы сенсора. Наиболее часто регулируют сварочный ток, напряжение, скорость сварки, положение, угол, чувствительность сенсора и т. п.

Системы управления роботизированных сварочных ячеек оснащаются прикладной системой математического обеспечения, в которую входит система стандартных подпрограмм, написанных на специальном проблемно-ориентированном языке программирования. Основные подпрограммы описывают последовательность операций в роботизированной сварочной ячейке, а типовые подпрограммы составляются с целью определения начальной точки сварки, самой сварки, ограничения сварки, позиционирования свариваемых конструктивных деталей, а также их погрузки и выгрузки. Принцип работы подпрограмм при поиске начальной точки сварки показан на рис. 8.12.

Во многих случаях при дуговой электросварке применяются визуальные системы. В реальных технических решениях применяется одно- или двухдорожечная система. Двухдорожечная система проходит сварочную дорожку дважды перед самой сваркой, когда робот изучает положение сварного шва на соответствующем объекте сварки. Однороджечная система обеспечивает считывание в течение процесса сварки, причем обеспечивается ее динамическое управление таким образом, чтобы происходила компенсация погрешностей установки. Более экономичным методом с точки зрения времени производства является применение однороджечной системы. Она может быть представлена в виде лазерной системы, которая осуществляет проводку электрода, или в виде системы считывания, которая позволяет определить центр сварного шва на основе колебательных перемещений по сварному шву, причем правильная траектория выбирается на основе информации о токе и напряжении. Одна из современных прогрессивных однороджечных систем считывания состоит из сварочной горелки, двух телекамер и лазерных источников (рис. 8.13).

В структуру роботизированных производственных систем для дуговой сварки в защитной атмосфере входит промышленный робот, сварочные манипуляторы, система управления и комплектное сварочное оборудование.

Промышленные роботы могут применяться для сварки трудносвариваемых материалов, для которых требуется высокий предварительный нагрев, роботы позволяют автоматизировать процесс сварки при производстве деталей средними, регулярно повторяющимися сериями (производственными партиями). При применении промышленных роботов в области сварки необходимо обеспечить высокую стабильность движущихся элементов (рука, захват) при выполнении отдельных пере-

мещений и точное положение после окончания движения. В большинстве случаев дуговой сварки с плавящимся электродом в защитной атмосфере (методы MIG, MAG, MOG) достаточной является точность при повторном позиционировании сварочной головки до ± 1 мм. В случае угловых сварных швов, полученных методами MAG, MOG и плазменной сваркой MIG, требуется точность с допуском $\pm 0,5$ мм. Требуется и максимальная степень использования промышленного робота в течение времени производства. Необходимо достижение степени использования до 90—95% времени производства (сюда не входит время, необходимое для замены у сварочного оборудования присадочного материала), и только в случае сложной установки крепежных элементов на сварочных манипуляторах и большом числе рабочих циклов степень использования времени производства может составить менее 90%. Программирование должно быть простым, нетрудоемким и не требующим специальных знаний. Оператор промышленного робота для дуговой сварки должен научиться программировать процесс сварки таким образом, чтобы его профессиональные значения и ловкость рук

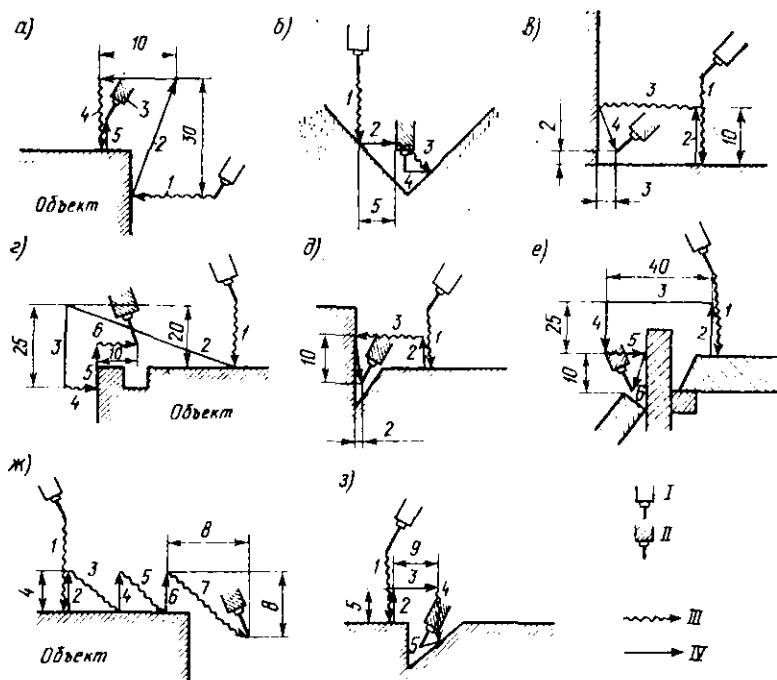
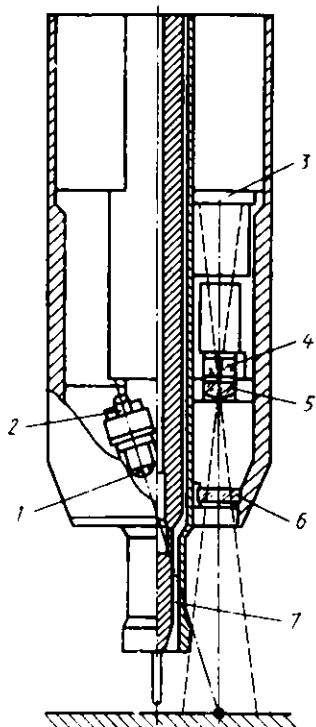


Рис. 8.12. Принципы работы подпрограмм при поиске начальной точки сварки. Детектирование:

а — конца объекта; б — контактных поверхностей; в — нулевой точки сварки; г — I-образных поверхностей; д — стыкового соединения; е — специального соединения; ж — конца объекта; з — V-образных поверхностей; I — положение электрода в начале поиска; II — то же, в конце поиска; III — направление движения при поиске; IV — то же, при отводе. Цифрами в кружках обозначена последовательность движений

Рис. 8.13. Однодорожечная сенсорная система для дуговой сварки:

1 - линза; 2 - лазер; 3 - оптоэлектронное устройство; 4 - интерференционный фильтр; 5 - сферическая линза; 6 - окно; 7 - подвод газа



способствовали эффективному и оптимальному использованию робота, получению заданных размеров и качеству сварного шва. Оптимальная «гибкость» зависит от степени свободы перемещения в рабочем пространстве. Для выполнения операций дуговой сварки требуется минимально пять степеней свободы промышленного робота. В зависимости от свариваемого объекта (его конструкции и сложности) дополнительные к указанным пяти степеням свободы могут обеспечиваться сварочным манипулятором или другим сварочным приспособлением. При дуговой сварке требуются непрерывное управление рабочим циклом промышленного робота и соответствующая емкость памяти системы управления промышленного робота (для ввода управляющих программ).

Наиболее целесообразным способом ввода программ в память системы управления промышленного робота является их запись на магнитную ленту или гибкий диск методом обучения, что позволяет реализовать относительно большие программы сварки. Для того чтобы охватить как можно больше сварочных операций, необходимо, чтобы скорость отдельных перемещений робота могла плавно регулироваться практически от 0 до 2,5 м/мин. Кроме того, требуется хотя бы одно очень быстрое перемещение руки (например, вращение). Достаточной считается максимальная скорость 1-1,5 м/с. Средняя масса манипулируемых объектов при сварочных процессах с плавящимся электродом в защитной атмосфере составляет 5-10 кг. При осуществлении других сварочных процессов (например, при сварке под слоем флюса) масса манипулируемых объектов значительно выше.

В качестве периферийного оборудования в роботизированных системах для дуговой сварки применяются сварочные манипуляторы свариваемых деталей. На мировом рынке существует около 100 стандартных типов сварочных манипуляторов, причем их ассортимент постоянно расширяется. Сварочные манипуляторы предназначены для крепления, переноса и установки свариваемых деталей в положения, требуемые при сварке с точки зрения применяемой технологии и доступности места сварки. Конструкции сварочных манипуляторов обеспечивают одновременно разжим и установку свариваемых деталей в течение

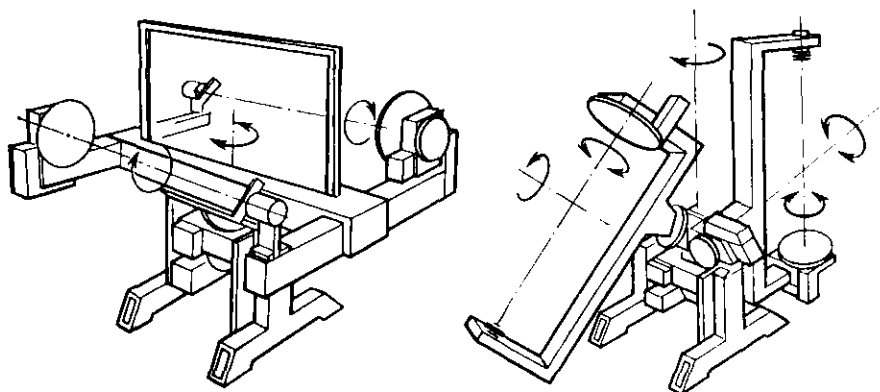


Рис. 8.14. Сварочные манипуляторы модульного типа для систем дуговой сварки

времени, которое перекрывается самой сваркой. При использовании таких конструкций свариваемые детали устанавливаются на столе сварочных манипуляторов вне радиуса действия робота. Позиционирование чаще всего проводится в дискретных положениях, отстоящих друг от друга на соответствующее расстояние. Позиционирование проводится автоматически на основании сигналов, поступающих от системы управления. Сварочные манипуляторы, предназначенные для систем дуговой сварки, показаны на рис. 8.14.

С точки зрения структуры важной составной частью роботизированных систем для дуговой сварки является их собственное сварочное оборудование, которое состоит из элементов, необходимых для реализации процесса дуговой сварки. Сварочное оборудование обеспечивает получение необходимой электрической и тепловой энергии, которая требуется для получения сварного шва. Кроме того, сварочное оборудование обеспечивает регулирование заданных технологических условий сварки и вспомогательных функций, необходимых для ее безотказного проведения. К таким функциям относятся, например, чистка и смазка горелки сварочной головки, отсасывание продуктов горения во время процесса сварки и т. п.

Типовую структуру сварочного оборудования роботизированных систем наиболее часто составляют:

1. Источник сварочного тока и напряжения. Наиболее часто применяется полуавтоматическое оборудование, которое позволяет: задавать минимальную и максимальную силу сварочного тока, плавно регулировать выходное напряжение источника, время импульса и продолжительность паузы при длинноимпульсной сварке, скорость подачи сварочной проволоки, регулировать частоту при короткоимпульсной сварке, подключать устройство нагрева защитной атмосферы, устройство охлаждения сварочной головки, регулятор давления газа в защитной атмосфере и т. п. В настоящее время источники сварочного

тока и напряжения приспособляют к дистанционному управлению от устройства предварительного выбора параметров сварки или от микропроцессорного устройства управления параметрами сварки.

2. Механизм подачи сварочной проволоки. Этот механизм чаще всего бывает задуман как проволочный барабан в соединении с устройством подачи проволоки или как проволочный барабан в соединении с устройством промежуточной подачи и устройством подачи проволоки. Отдельные элементы механизма располагаются на качающейся или поворотной несущей стойке или непосредственно на конструкции промышленного робота. Механизм позволяет подавать сплошную или полую проволоку с широким диапазоном диаметров на расстояние от 2 до 16 м.

3. Сварочная головка, конструкция которой состоит из непосредственно самой горелки, держателя горелки и сенсорной системы. Применяемые в настоящее время серийные горелки позволяют работать в течение длительного времени без необходимости очищать разбрызганный металл сварного шва. Применяются также специальные горелки с самоочищающим устройством, обеспечивающие хороший доступ к месту сварки с точки зрения формы и размеров шва.

Охлаждаются горелки чаще всего водой или воздухом. Конструкция держателей технологических головок обеспечивает надежное крепление, повторную установку сварочной горелки в исходную точку, ее откидывание в случае нерегулярной работы, а также крепление сенсорных систем положения кромок сварного шва, сварных швов и пренятствий на свариваемой детали, крепление механизмов подачи и отвода горелки и сенсоров, крепление комплекса кабелей, шлангов и фасонных сифонов отсасывающего устройства. Технологические головки наиболее часто оснащаются сенсорными системами на базе контактных, емкостных, оптических, индуктивных и других сенсорных датчиков.

4. Устройство предварительного выбора параметров сварки или устройство программирования параметров сварки. Устройства предварительного выбора параметров сварки выполняются в виде отдельного полуавтоматического оборудования и поэтому они обеспечивают возможности предварительного выбора режимов сварки. Управление этим устройством - ручное или автоматическое от системы управления робота. Устройства программирования параметров сварки, реализованные на базе микропроцессорной техники, представляют собой инновацию более высокого порядка и кроме стандартных функций позволяют проводить программирование сварочных участков, автоматический выбор программ, а также выполнять другие функции.

5. Вспомогательные устройства, к которым относятся:

устройство охлаждения сварочной горелки, которое обеспечивает подвод охлаждающего вещества к сварочной горелке и его отвод назад для охлаждения в холодильнике устройства;

устройство для очистки сварочной горелки, основное назначение которого заключается в обеспечении периодической механической

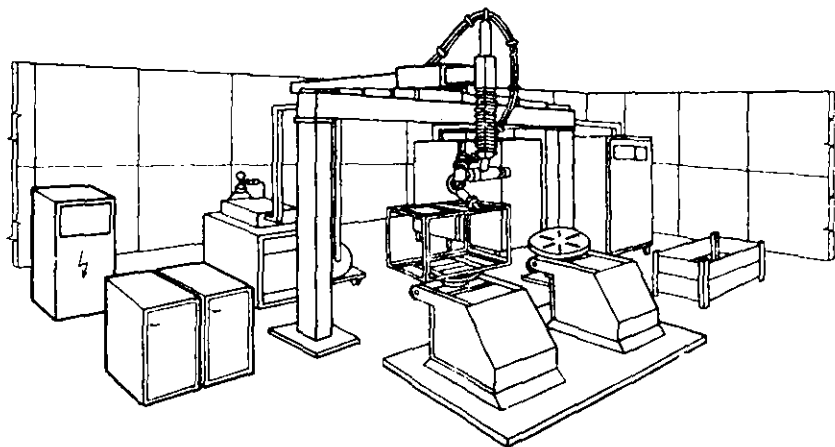


Рис. 8.15. Типовая структура роботизированной системы для дуговой сварки с порталным роботом «Изатрон» и двумя сварочными манипуляторами

очистки концевых частей горелки от разбрызганного металла во время перерывов в процессе сварки;

отсасывающие и фильтровальные устройства, которые обеспечивают удаление продуктов горения, образующихся во время сварки.

6. Резервуар с защитным газом с ручным или автоматически управляемым регулятором давления.

В области технологических процессов дуговой сварки произошла определенная стабилизация компоновок роботизированных сварочных систем. Наиболее многочисленную группу образуют системы с одним стационарным или мобильным промышленным роботом, который чаще всего работает в угловой системе координат. Возрастает доля агрегатирования сварочных систем с промышленными роботами, которые работают в декартовой системе координат. Перемещение робота по порталу позволяет проводить сварку крупногабаритных деталей, например в судостроительной промышленности. В некоторых случаях применяются небольшие сварочные роботы (тип «Апрентайс»), причем как в стандартной компоновке, так и смонтированные на подвижных ножках или на стойке. Пример компоновки роботизированной системы для дуговой сварки с порталным роботом «Изатрон» показан на рис. 8.15. Одновременно со сваркой в другом сварочном манипуляторе устанавливается следующая свариваемая деталь.

§ 8.5. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Наиболее широко промышленные роботы применяются при автоматизации поверхностной обработки машиностроительных и неаппаратно-строительных изделий. Технологические процессы поверхностной обработки изделий относятся к наиболее вредным для здоровья видам

работ, поэтому их автоматизации во всем мире уделяется особое внимание. Их вредность для здоровья человека определяется видом применяемых материалов, содержащих различные растворители, красители, пигменты и другие вредные для здоровья вещества.

Наиболее универсальным способом автоматизации поверхностной обработки изделий, связанной с напылением и лакированием, является применение промышленных роботов, оснащенных пистолетами-распылителями. Автоматизация поверхностной обработки изделий путем применения промышленных роботов, кроме исключения человека из вредного для здоровья процесса и кроме автоматизации производственного процесса, позволяет повысить производительность труда, получить более высокое качество поверхностной обработки, достигнуть экономии материалов и сырья, а также сократить расход энергии.

Применение промышленных роботов при поверхностной обработке изделий оправдало себя прежде всего при:

- - нанесении жидкого материала в ванне;
- - электростатическом напылении на керамические изделия жидкой эмали;
- - нанесении защитных покрытий на нижние части кузовов автомобилей;
- - нанесении чувствительного материала на стенки приемных телевизионных электронно-лучевых трубок;
- - нанесении глазури на керамические части медицинского оборудования;
- - смачивании деталей в жидкой эмали.

Из технологических методов поверхностной обработки изделий с применением промышленных роботов наиболее распространены следующие методы:

- воздушного и безвоздушного напыления наносимых материалов;
- электростатического напыления в поле высокого напряжения;
- струйные методы напыления (обливание) с последующей выдержкой в парах растворителей;
- погружения с последующей выдержкой в парах растворителей;
- электролитической металлизации и гальванизации.

Выбор технологического метода поверхностной обработки зависит от многих факторов. Наиболее важны следующие: вид производства (штучное, серийное, массовое), форма и габаритные размеры изделий, свойства применяемых лакокрасочных материалов и веществ, а также требования к получаемым покрытиям (антикоррозионные, термостойкие, декоративные и т. п.).

Технологические методы воздушного, безвоздушного и электростатического напыления лакокрасочных материалов и веществ применяются при поверхностной обработке изделий различной формы и размеров. Напыление проводится в пульверизационных камерах с горизонтальным или вертикальным отсасыванием. В зависимости от характеристик транспортной системы изделий при таких способах напыления

пульверизационные камеры разделяются на закрытые, которые применяются в условиях штучного и мелкосерийного производства, и на открытые (сквозные), связанные с транспортной системой, которые применяются в условиях серийного и массового производства.

Посредством воздушного, безвоздушного, электростатического и комбинированного напыления проводят примерно 70% всех видов поверхностной обработки изделий. Наружные и внутренние поверхности изделий не оказывают существенное влияние на выбор технологического метода напыления. Напыление в электростатическом поле выгодно, особенно в случае сложных, труднодоступных поверхностей в форме решеток.

Технологические методы струйного напыления с последующей выдержкой в парах растворителей применяются в крупносерийном и массовом производстве. Этим способом можно обрабатывать поверхность изделий любой формы и любых размеров, однако необходимо, чтобы поверхность изделий обеспечивала хороший сток избыточного материала, наносимого на поверхность. При данном способе поверхностной обработки изделия, перемещаемые транспортной системой, проходят через продольный туннель, который состоит из входной камеры, пульверизационной камеры, камеры с растворителями и выходной камеры. Отдельные рабочие камеры разделены воздушной преградой, препятствующей утечке испарений через транспортные проемы.

Технологические методы погружения с последующей выдержкой в парах растворителей также применяются в крупносерийном и массовом производстве. Наиболее часто они реализуются в камерах туннельного типа, состоящих из входной камеры, камеры погружения, камеры паров растворителей и выходной камеры. В камере погружения находятся ванны, в которые погружаются изделия, перемещаемые или транспортной системой, или специальными промышленными роботами. Отдельные камеры разделены воздушными преградами.

Технологические процессы электролитической металлизации применяются при обработке изделий малых и средних размеров в крупносерийном и массовом производстве. Этот процесс проводится в камерах туннельного типа. В верхней части туннеля находится транспортная или манипуляционная система, которая служит для погружения изделий в ванну. Металлизированные изделия подвешиваются на специальные носители, которые электрически изолированы от транспортной системы. Технологический процесс электролитической металлизации проводится непрерывно шагами в соответствии с заранее заданной программой. Структура данных систем, кроме туннеля с ваннами, содержащих электролитические материалы, состоит из двух зон струйного споласкивания, системы смещения и фильтрации, системы нагрева и охлаждения применяемых материалов и системы автоматического управления и контроля параметров технологического процесса.

В технологических процессах гальванизации изделий промышленные роботы применяются для манипуляции изделиями. Промышлен-

ные работы проводят снятие изделий с транспортной системы и их погрузки в отдельные ванны, а также установку изделий на транспортную систему.

Роботизированные производственные системы для поверхностной обработки в структурном отношении относятся к наиболее простым, так как в них отсутствуют обрабатывающие станки. Как правило, при создании систем такого типа требуются: промышленные роботы, которые обеспечивают выполнение технологического процесса поверхностной обработки, технологическое оборудование, включающее в себя пистолет-распылитель, резервуары с краской, баллоны со сжатым воздухом и т. п., транспортная система для изделий, устройство идентификации изделий, защитные кабинки, отсасывающая установка и другие вспомогательные средства, а также система управления.

Промышленные роботы, применяемые для напыления и лакирования, должны удовлетворять следующим требованиям:

- рабочий орган промышленного робота должен выполнять пространственное перемещение, в зависимости от возможности полностью совпадающее с перемещением рук, плечей и бедер человека при напылении;

- все перемещения должны быть упругими и плавными, а скорость перемещений должна быть достаточной для напыления сложных объектов;

- повторение программы должно быть надежным;

- робот должен быть надежным;

- требуется высокая скорость перемещения пистолета-распылителя (около 2 м/с);

- точность позиционирования является менее важной ($\pm 2,0 \dots \pm 5,0$ мм), так как при напылении пистолет находится на расстоянии примерно 200 мм от напыляемой поверхности.

Сама система управления промышленного робота должна удовлетворять следующим требованиям:

- с достаточной точностью осуществлять управление по нескольким осям перемещения, необходимым для приспособления к контурам изделия;

- позволять выбирать программу для отдельных типов изделий;

- позволять проводить отладку и редактирование отдельных частей программы;

- обеспечивать синхронизацию движения с контейнером при напылении в движении;

- обеспечивать напыление определенной отдельно выбранной части детали;

- содержать программы изменения цвета и количества краски;

- быстро идентифицировать, локализовать и устранять неисправности.

Промышленные роботы являются основным определяющим техническим средством, необходимым для роботизированных систем поверх-

ностной обработки. В созданных до сих пор системах поверхностной обработки применялись:

- роботы-распылители «Тралфа», «Рено-Аома», «Корел», РВ-231 и т. п.;
- универсальные роботы «Асеа», «Юнимейт», «Версатран»;
- специализированные и транспортные роботы и манипуляторы, которые часто являются составной частью гальванических линий и систем (GM 500.C03.01, CM 40 F-280-01 и т. п.).

Выбор промышленного робота для поверхностной обработки в значительной мере зависит от геометрии изделия и схемы перемещения изделия в процессе напыления. В том случае, если изделие находится, например, на позиционирующем столе и необходим весь комплекс перемещений, то обоснованным является выбор специализированного напыляющего манипулятора с минимальным числом осей перемещения. Наиболее часто такая структура используется при поверхностной обработке простых плоских поверхностей. В том случае, если при поверхностной обработке изделий необходимо перемещение по более чем двум осям обоснованным является применение промышленного робота, оснащенного пистолетом-распылителем. Число степеней свободы зависит от формы, размеров и траектории перемещения изделия. Для поверхностной обработки изделий часто применяются пистолеты-распылители. Существует широкий ассортимент пневматических, электростатических и других типов пистолетов-распылителей.

В качестве транспортных систем наиболее широко применяются подвесные конвейеры с прерывистым или непрерывным перемещением. В системах, оснащенных конвейерами с прерывистым перемещением, операции напыления выполняются в жестко фиксированных рабочих точках. Данный метод упрощает программирование робота. Новые напыляющие роботы оснащаются системами синхронизации, которые

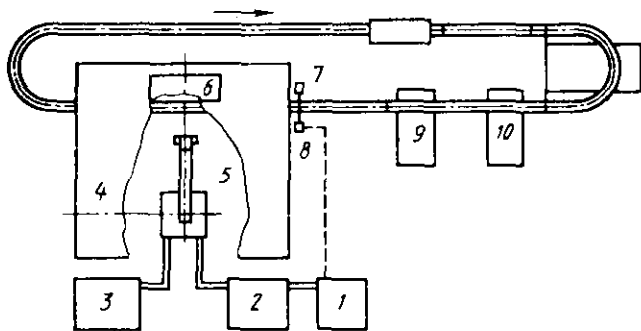


Рис. 8.16. Типовая структура роботизированной системы для одностороннего напыления несложных объектов:

1 — контрольно-блокировочная панель; 2 — устройство управления робота; 3 — гидравлический блок робота; 4 — камера напыления; 5 — промышленный робот; 6 — отсасывающее устройство; 7 — подвесной конвейер; 8 — устройство идентификации; 9 — загрузочная палета; 10 — разгрузочная палета

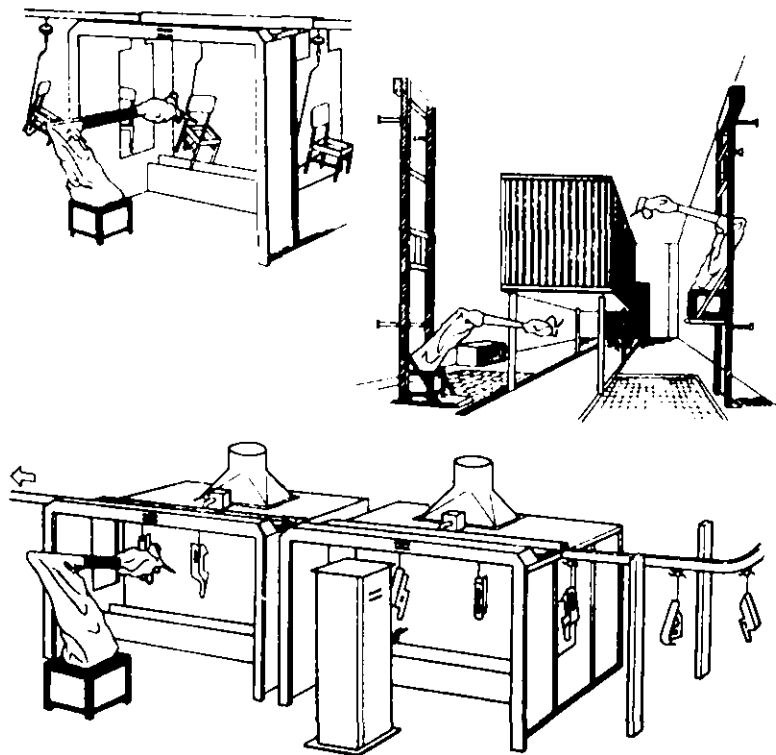


Рис. 8.17. Примеры типовой структуры роботизированных систем для поверхностной обработки с промышленным роботом «Коут-А-Мэтик»

обеспечивают напыление изделий в процессе движения. Напыление возможно не только при равномерном перемещении конвейера, но и при его разгоне и торможении.

Оснащение роботизированных систем поверхностной обработки устройствами идентификации позволяет оптимальным способом напылять различные виды изделий без необходимости сортировать их при погрузке на транспортную систему. На основании информации, поступающей от устройства идентификации, происходит автоматический выбор программы работы промышленного робота. Устройства идентификации, как правило, выполнены в виде системы выключателей, которые проводят идентификацию кода изделия на палете транспортной системы. Перспективны прежде всего оптоэлектронные системы распознавания, обеспечивающие прямую идентификацию изделия.

Особым решением являются системы, где требуется напыление объектов изнутри (например, кузов автомобиля), когда технологическая головка робота должна перемещаться в разных направлениях в огра-

ниченном пространстве. В данном случае целесообразно применять робот с составной рукой с семью степенями свободы или робот с гибкой рукой.

Типовая структура роботизированной системы для одностороннего напыления несложных объектов (фланцы и т. п.), у которых можно получить полное покрытие одним роботом, представлена на рис. 8.16. Оператор укладывает объекты на подвесной конвейер, оснащенный устройством идентификации, которое посредством контрольно-блокировочной системы обеспечивает автоматический выбор программы напыления. Робот оснащен устройством синхронизации, поэтому напыление можно проводить в движении.

Примеры типовых структур роботизированных систем поверхностной обработки с промышленным роботом «Коут-А-Мэтик» показаны на рис. 8.17.

§ 8.6. ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ для ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Ячейки и системы с промышленными роботами. Основной ячейкой роботизированных производственных систем для изготовления деталей является пара типа «станок с ЧПУ — промышленный робот». От количества, способа объединения и степени автоматизации этих основных составляющих элементов зависит структура роботизированных производственных систем.

Опыт создания роботизированных систем свидетельствует о том, что не существует больших проблем в области создания функционально удовлетворительных ячеек типа «станок с ЧПУ — промышленный робот» при следующих предпосылках:

- применяется промышленный робот, у которого технические параметры (конфигурация, размеры и расположение рабочей зоны, грузоподъемность, повторная точность позиционирования, тип управления, число команд программирования, число каналов ввода и выводов и т. п.) соответствуют техническим параметрам обслуживаемого станка с ЧПУ;

- применяется захват, который позволяет исключить неточность позиционирования промышленного робота и обеспечивает надежное крепление манипулируемых объектов в течение манипуляционного цикла;

- применяется оборудование, которое обеспечивает неизменный вход и выход обрабатываемых объектов и которое позволяет автоматизировать требуемые вспомогательные функции.

Однако при реализации ячеек типа «станок с ЧПУ — промышленный робот» в условиях производства необходимо принимать в расчет вопросы экономической эффективности и технико-организационные факторы, влияющие на работу ячейки. С этой точки зрения можно констатировать, что индивидуально ячейки типа «станок с ЧПУ — промышленный робот» имеют следующие недостатки:

— для эффективной работы станка с ЧПУ требуется, чтобы он обрабатывал главным образом детали партиями примерно по 5—50 шт. Из этого, однако, вытекает, что основное время примерно в 5—20 раз больше, чем время, необходимое для автоматического манипулирования детали промышленным роботом;

— существует несоответствие в программоносителях промышленного робота и станков с ЧПУ. В большинстве случаев при программировании промышленных роботов перфолента не применяется;

— стандартные способы подготовки программ для станка с ЧПУ и промышленного робота принципиально отличаются друг от друга. Система «запись — воспроизведение», которая наиболее часто применяется у промышленных роботов, требует много времени и обуславливает длительные простои станков с ЧПУ в случае необходимого изменения производства;

— существует несоответствие между конструктивными решениями исполнительных органов промышленных роботов и станков с ЧПУ, находящихся в непосредственном взаимодействии друг с другом. У станков с ЧПУ второго поколения отсутствуют рабочие зоны, пригодные для обслуживания промышленным роботом;

— специальные решения устройств ввода и вывода, самостоятельных для каждого станка с ЧПУ, экономически являются неприемлемыми;

в производственном обслуживании промышленного робота и станка с ЧПУ существуют большие различия. Для обслуживания рабочей ячейки требуется персонал (программисты, техники) двух специальностей.

Проведенный подробный анализ свидетельствует о том, что по экономическим и производственным причинам в большинстве случаев нецелесообразно обслуживать один станок с ЧПУ одним промышленным роботом. Аналогична ситуация в случае циклического обслуживания промышленным роботом двух или трех станков с ЧПУ, где, хотя и имеет место более высокая степень использования промышленного робота, возможности станков с ЧПУ сильно ограничены (ограничение ассортимента обрабатываемых изделий и т. п.).

В этой связи тенденции развития однозначно направлены на применение промышленных роботов для обслуживания станков с ЧПУ, объединенных в гибкие производственные системы с управлением от ЭВМ. Высокая степень интеграции технологических, манипуляционных элементов и элементов управления в гибкой производственной системе позволяет устранить основные препятствия на пути применения промышленных роботов для обслуживания станков с ЧПУ. Происходит объединение систем управления и программирования, управление от ЭВМ обеспечивает оптимальное использование всех элементов производственной системы, конструктивное решение элементов интеграции находится на более высоком уровне, упрощаются ремонт и обслуживание, а также получаем более благоприятные экономические характеристики.

Реализованные проекты роботизированных производственных систем механообработки подтвердили прогрессивность такой концепции в случае небольших производственных единиц. В отличие от других концепций роботизированные производственные системы обладают более высокой гибкостью, требуют меньших капитальных вложений, а также характеризуются меньшим временем разработки и внедрения.

Конкурентоспособность роботизированных производственных систем по сравнению с другими типами систем заключается прежде всего в более высокой гибкости при подготовке системы к работе при изменении производственной партии. Снижение потерь времени связано с концентрацией операций манипулирования промышленным роботом и со снижением числа используемого оборудования.

На основное пространственное упорядочение роботизированных производственных систем кроме других параметров наиболее существенное влияние оказывают тип обрабатывающего станка, технические параметры и прикладные возможности промышленного робота, а также конструкционные и технологические особенности периферийного оборудования. В настоящее время в качестве типовых структур выделились следующие виды роботизированных производственных систем:

1. Системы, у которых операционное манипулирование объектами производства проводят промышленные роботы или манипуляторы, являющиеся составной частью обрабатывающего станка или образующие самостоятельную манипуляционную единицу.

2. Пилотные системы, у которых промышленный робот осуществляет двух- или трехстаночное обслуживание, а также обслуживание вспомогательных накопительных устройств.

3. Системы, у которых обрабатывающие станки обслуживает робот, имеющий ходовую часть.

Следует отметить широкую представленность роботизированных производственных систем на базе индивидуального обслуживания обрабатывающих станков промышленным роботом в структуре систем прикладного характера. Это объясняется постепенным приспособлением конструкции обрабатывающих станков к автоматизированному манипулированию объектами производства. Системы такого типа кроме автоматизированной обработки деталей обеспечивают их автоматизированное манипулирование в пространстве, позиционирование и фиксацию в рабочей зоне обрабатывающего станка или периферийного оборудования. Определялось несколько подходов к конструкторской разработке структур следующих систем:

1. Системы с интегрированной конструкцией, у которых промышленный робот встраивается в конструкцию обрабатывающего станка.

2. Системы с интегрированной конструкцией, у которых промышленный робот расположен на портальной или консольной конструкции. У систем данного типа промышленный робот является неотъемлемой частью рабочей ячейки и осуществляет операционное манипулирование заготовками и деталями. На рис. 8.18 показана типовая структура

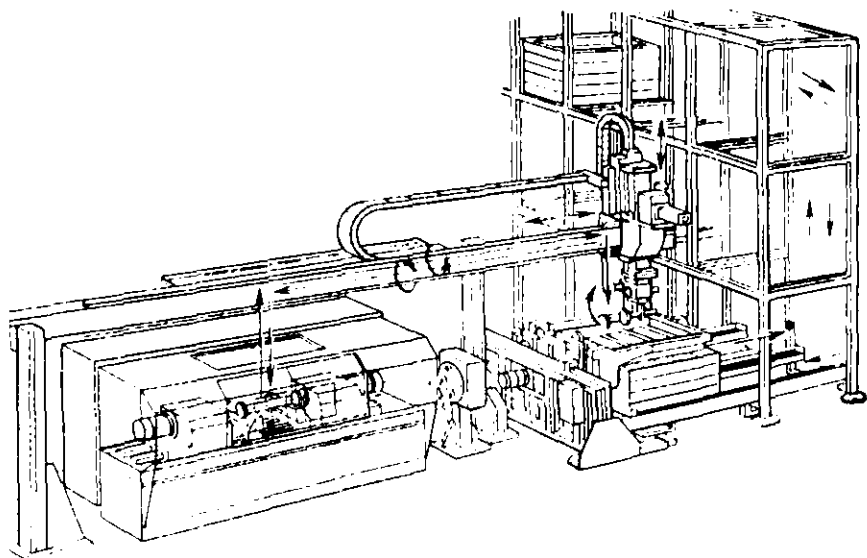


Рис. 8.18. Структура роботизированной производственной системы с интегрированной портальной конструкцией

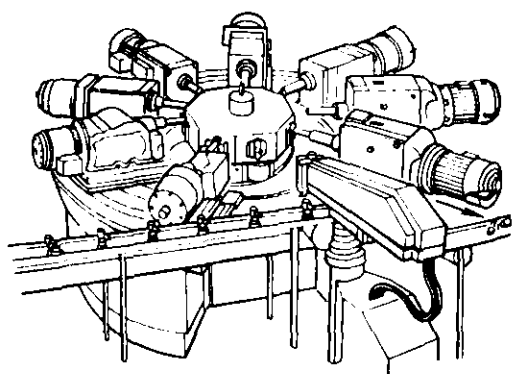


Рис. 8.19. Структура роботизированной системы с индивидуальным обслуживанием станка промышленным роботом

системы с порталным роботом, обрабатывающим станком с ЧПУ и стеллажным складом системных палет с объектами производства.

3. Системы с индивидуальным обслуживанием обрабатывающего станка. У таких систем обрабатывающий станок обслуживает автономно работающий промышленный робот, который проводит операционное манипулирование заготовками и деталями. Пример такой структуры системы представлен на рис. 8.19.

Структуры роботизированных производственных систем пилотного типа, у которых промышленный робот осуществляет многостаночное обслуживание, наиболее распространены. Характерный признак данной структуры состоит в том, что обрабатывающие станки и периферийное оборудование расположены в рабочей зоне промышленного робота. Пространственная структура зависит прежде всего от систем-

ных свойств промышленного робота. Промышленный робот является центральным звеном системы и концентрирует вокруг себя большинство функций манипулирования и управления. Структуры данного типа особенно эффективны в тех случаях, когда при большом основном времени робот может обеспечить двух- и многостаночное обслуживание обрабатывающих станков. Манипуляционная система комплектуется межоперационными накопителями и другим периферийным оборудованием.

Широко применяются и роботизированные производственные системы с подвижным роботом. Они представляют собой объединение обрабатывающих станков, промышленных роботов, периферийного и других видов оборудования, а также систем управления более высокого уровня. Выделились в принципе два основных типа систем: системы с напольным подвижным промышленным роботом и системы с подвесным подвижным промышленным роботом.

Очень хорошую перспективу имеют структуры с подвесным роботом вследствие лучшего использования рабочего пространства, улучшения доступа обслуживающего персонала к системе при ремонте и программировании и т. п. Структуры систем с подвижным промышленным роботом (рис. 8.20) эффективны в случае большого основного времени, когда существует возможность многостаночного обслуживания.

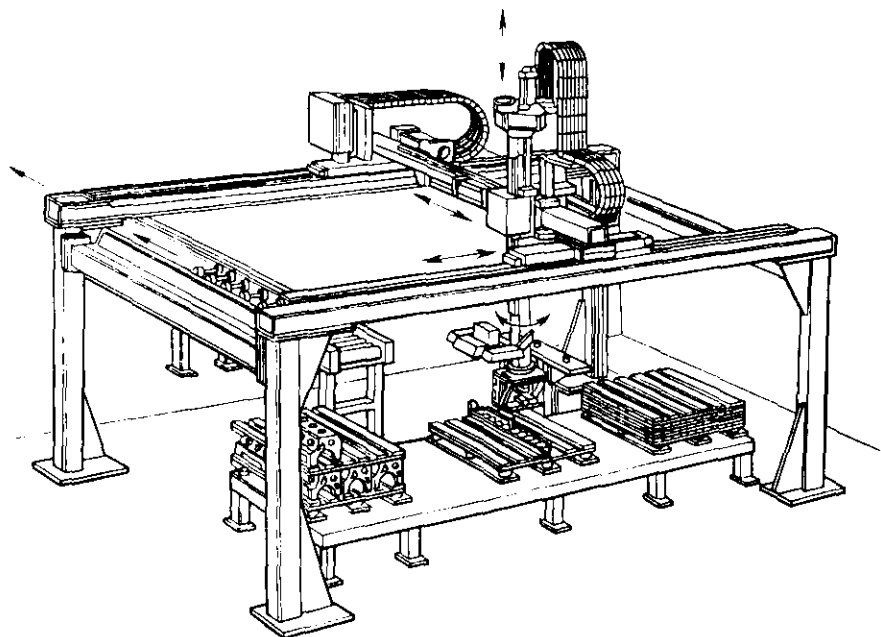


Рис. 8.20. Пример структуры роботизированной системы с мобильным порталным роботом

Гибкие производственные комплексы. Гибкие производственные системы представляют собой большое число различных видов оборудования, установленного в производственных цехах. До сих пор не существует базовой модели их конфигурации, в соответствии с которой могли бы проводиться их классификация и проектирование. В качестве примера на рис. 8.21 приводится топология конфигураций, которая позволяет проводить их распознавание и получать представление о их структуре.

Основные точки зрения по вопросу распознавания можно интерпретировать следующим образом. Гибкой производственной системой можно считать ячейки типа обрабатывающих центров. Комплексы, оснащенные обрабатывающими центрами, могут иметь «безлюдность» в работе в части замены инструментальных магазинов, а также могут оснащаться транспортной системой палетизации объектов производства. В состав производственного комплекса может входить несколько обрабатывающих центров.

Гибкие производственные комплексы могут иметь разный иерархический уровень (обрабатывающий центр, ячейка, ППС, линия).

На каждом уровне важным является транспорт изготавливаемых объектов и инструментов, отвод стружки, вспомогательные операции, такие, как мойка и автоматическое обеспечение качества.

На решение вопроса транспорта здесь большое влияние оказывает гибкость производственного комплекса. Линейные комплексы являются несложными для изменения манипуляций. Обычно для них требуются промежуточные склады, для того чтобы компенсировать временные изменения, возникающие вследствие неоднородности изделий. Промежуточные склады могут находиться рядом со станками, может применяться центральный склад. Решение вопроса сбалансированности пропускной способности технологической и транспортной системы связано с соотношением машинных циклов и скорости работы комплекса и позволяет определить размеры промежуточных складов, предупредить возможные поломки, их последствия и т. п.

Технологические и транспортные системы не обязательно должны быть сопряженными. Транспортная система может функционировать как линия непрерывного действия и иметь отводы к местам загрузки и выгрузки со станка или к промежуточным складам. Смысл заключается в том, что операции манипулирования и технологической обработки могут выполняться независимо друг от друга. Важным является упорядочение внутренних и внешних связей данных двух подсистем. При проектировании производственного комплекса должен быть обеспечен системный подход, причем необходимо тщательно проверить граничные условия его эксплуатации. Гибкое производство должно являться частью промышленно-экономического плана, целью которого является получение наивысшей оборачиваемости затрат в изменяющихся условиях сбыта при модернизации технологии и обновлении изделий. Оборачиваемость зависит от «производства, осуществленного

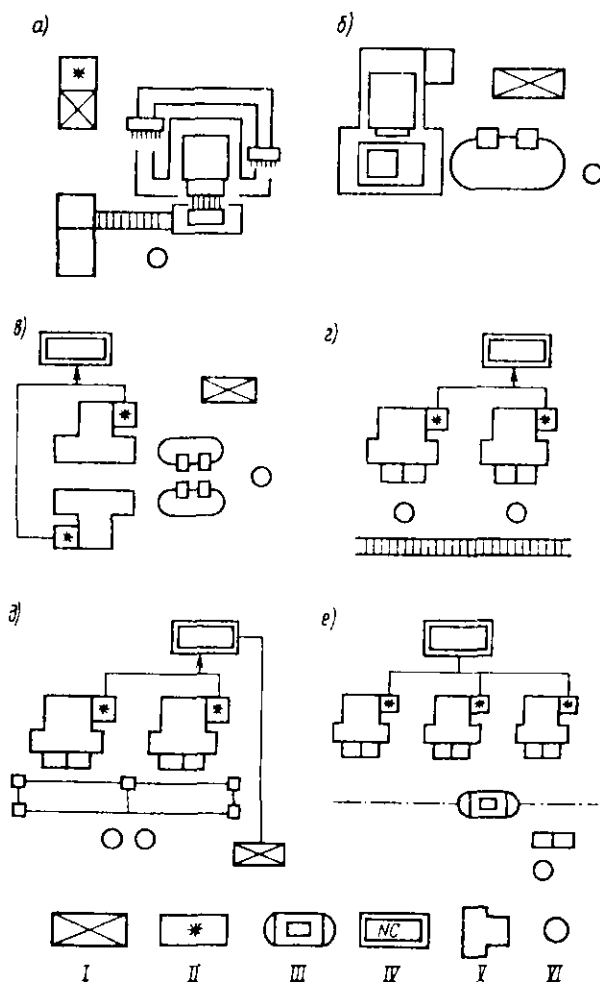
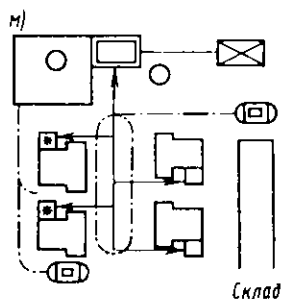
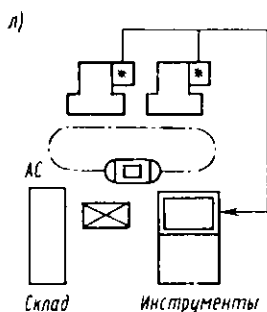
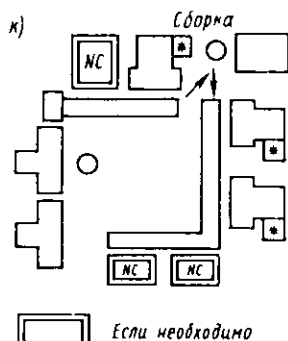
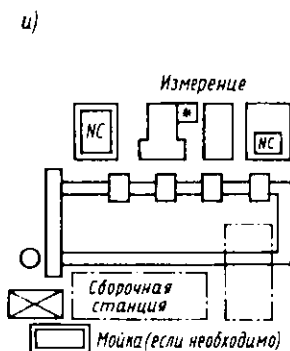
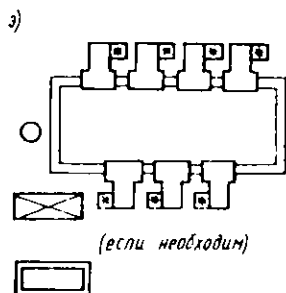
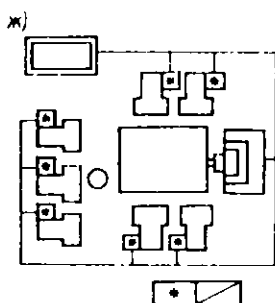


Рис. 8.21. Примеры конфигурации гибкой производственной системы:

а — сменные головки (инструментальный центр); б — обрабатывающий центр и детали с ний центр с конвейером, обслуживаемым вручную; в — многоцелевые станки с автоматическими станками с ЧПУ; г — конвейер, связанный с обрабатывающими центрами; д, к — сменное управление центрами, складом и инструментом; / — последовательная система управ V — станки широкого назначения; VI — оператор



палетам; в -- несколько обрабатывающих центров и детали с палетами; г -- обрабатывающим конвейером; е -- многоцелевые станки с робокарой; ж -- одновременное управление непроизводственные линии, л -- параллельное управление центрами и складом; м -- одновременное управление; II -- устройство управления CNC; III -- робокара -- AGVS; IV -- специальные станки;

в необходимый момент времени», при низких запасах и минимальных затратах на изделие.

Резервы требуемой гибкости в рассматриваемое время могут находиться в следующих областях:

- в выборе группы объектов производства из множества групп;
- в группе (приемлемость новых или частично отличающихся объектов производства в рамках более широких границ);
- в производственном процессе, который подразумевает или произвольную очередность обработки, или альтернативные возможности использования технических средств. Целью является сбалансированность пропускной способности и требований выхода готовых изделий;
- в проектировании -- несложное изменение дизайна;
- объем производства — способность приспосабливать производимые объемы продукции к плановым заданиям;
- структуры производственного комплекса — потенциальные возможности расширения системы (аппаратных средств и математического обеспечения) с учетом будущих требований к расширению, новой технологии, системы CAD/CAM, планирования производства, управления и контроля иерархических систем и ограниченного развития. Ключевым требованием является обеспечение возможности расширения математического обеспечения в новых условиях.

Данный диапазон гибкости колеблется от наиболее простой «тактической» гибкости до ее высшей стратегической формы. Совершенный комплекс обеспечивает «гибкость группы изделия», т. е. открытость по отношению к изменениям вариантов изделий, процессов и т. п.

Для того чтобы данная предпосылка была выполнена, необходимо располагать определенными критериями. Например, обрабатывающие центры должны быть оснащены накопителями палет и иметь инструментальные магазины большой емкости, что позволит получить высокую степень гибкости производства объектов. Транспортная система должна обеспечивать гибкость в выборе деталей для транспортировки, сводить к минимуму издержки эксплуатации системы, связанные с поломкой станков или их профилактикой, далее, обеспечивать гибкость в расширении пропускной способности и проведении различного рода модификаций.

Развитие машинного и системного технического интеллекта приобретает все большее значение. Оно охватывает автоматизацию метрологии и вопросы обеспечения качества, например с применением лазерного измерения, включая распознавание изображений, сенсорную обратную связь и анализ признаков. Машинный технический интеллект обеспечивает мониторинг движения инструмента, диагностирование с применением ЭВМ, причем не только в пределах одного станка, но и в группах станков. Для надежной автоматизации существенно пространственное расположение функциональных блоков и систем манипулирования. Машинный технический интеллект позволяет автоматически исключать системные или механические неисправности.

Комплекс, связанный со спектром объектов производства, обеспечивает детальное выделение инструментального оснащения и операций. При этом принимается в расчет последовательность рабочих операций, требования к определению инструментов, заданию рабочих режимов и стойкости инструментов. Целью является оптимальное использование системы (коэффициент сменности 2,5) или максимизация общего объема производимой продукции. Конечная функция считается объективным критерием управления и контроля. Как правило, ее получают путем применения метода приближенных коэффициентов. Входные данные содержат текущую информацию об операциях, количестве инструментов, емкости накопителей и т. п. К ним добавляются переменные данные о количестве продукции, типах производственного оборудования, распределении инструментов и их стойкости и т. п.

Проектирование направлено на достижение оптимума. Здесь происходят сбор и сортировка рабочих данных с приемлемым использованием, а также получение плановых данных для мест загрузки и выгрузки деталей со станков. Работа производственного и транспортного оборудования базируется на «палетных циклах», а также позволяет определять требования к инструментам, приспособлениям и т. п.

Производительность установленного станка должна отвечать объему работы и ее разнородности. Каждый объект производства, обрабатываемый на станке, «связывает» определенное множество инструментов, палет и приспособлений, которые должны быть заранее спланированы и помещены в конкретный инструментальный магазин и в соответствующее место для палет. Экономические аспекты планирования данных подсистем влияют на общую производительность комплекса.

Компромиссные решения вытекают из разрешения противоречий между использованием станка и палетным инвентарем, использованием станка и инструментальным инвентарем и изменчивостью партий, их последовательностью и сменой.

Инструментальные системы состоят из инструментального склада и склада инвентаря, устройств контроля и восстановления изношенных инструментов, устройств повторного шлифования и настройки.

Назначение инструментального склада:

- хранение соответствующего набора инструментов, который входит в основное математическое обеспечение. Короткие циклы обращения инструментов свидетельствуют об их высокой степени использования в том случае, если они собраны и уложены в соответствии с образованными группами объектов;

- исключение старых и использование новых инструментов в соответствии с планом;

- идентификация, установка и кодирование инструментов для повторного применения.

Возрастает важность хранения инструментов и управления инвентарем. В функции планирования инструментов входит:

- размещение инструментов в соответствии с плановым производством объектов;

- транспортировка инструментов к станку и от станка;
- синхронная выгрузка и возвращение инструментальных магазинов в соответствии с программой системы управления типа DNC;
- реакция корректирующего характера на сигнализацию о неисправностях, включая замену отдельных инструментов.

В качестве основных направлений использования инструментов можно выделить следующие:

- полная степень использования инструмента. Каждый станок получает необходимый инструмент. Данная концепция «неограниченности в удовлетворении потребности» приводит к большому количеству инструментального инвентаря с его большой изменчивостью при малочисленных партиях изделий;

- стратегия снабжения партиями. Инструменты предоставляются на определенный период. Для управления необходима ЭВМ;

- стратегия непрерывного пополнения запасов. В зависимости от необходимости станки непрерывно снабжаются инструментами. Не требуется, чтобы инструменты «выдерживались» в течение определенного планового периода. В принципе они могут находиться в работе более длительное время. Для управления необходима сложная вычислительная система.

При традиционных методах проводилась относительно постоянная плановая работа как основа для снабжения инструментами. В случае поломки станка они позволяют подавать детали к другому, имеющемуся в распоряжении станку (например, не полностью загруженному), в результате чего компенсируется снижение гибкости;

- стратегия постоянного запаса. Целью этой стратегии является создание постоянного запаса интенсивно применяемых инструментов, которые могут обеспечить получение значительной части изготавливаемых изделий. Пополнение запасов инструментов сводится до минимума путем выбора объектов в последовательности, обеспечивающей получение такого минимума.

Особенно важно здесь информационное сопряжение компонентов комплекса и управление ими. Основная задача заключается в обеспечении сопряжения станков, транспортной системы и т. д. с помощью аппаратных средств и математического обеспечения. При транспортировке материалов и при манипуляциях используется обычный интерфейс и принципы сетевого анализа. Удовлетворительное решение этих проблем невозможно без системного сотрудничества в глобальном масштабе и без стандартизации.

Как уже отмечалось, возможны различные структуры гибких производственных комплексов. Обобщенная структура такого комплекса представлена на рис. 8.22. Характерным признаком гибких производственных комплексов является то, что на производственных площадях сосредоточены основные производственные и вспомогательные подсистемы. Вспомогательные подсистемы обеспечивают выполнение функций, связанных со складированием и поиском объектов производства, инструментов и рабочих принадлежностей. Их межоперационное ма-

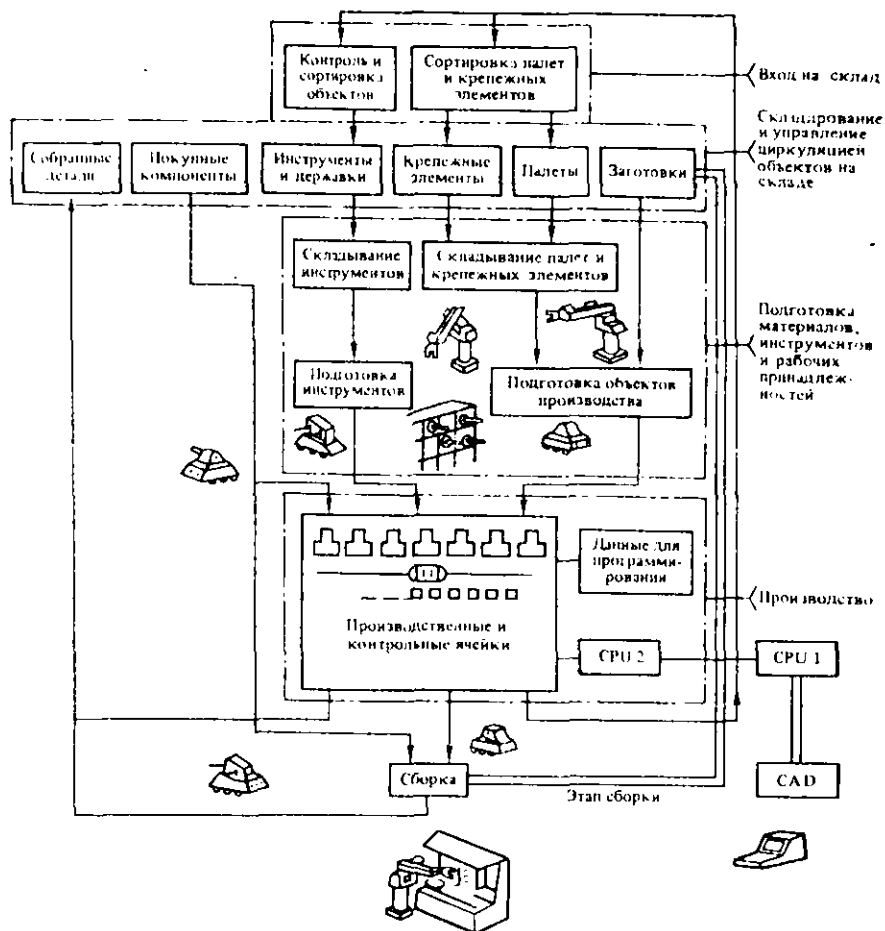


Рис. 8.22. Структура гибкого производственного комплекса

нипулирование чаще всего осуществляется с помощью палет. Целевая подсистема в гибких производственных комплексах представляет собой склад материальных объектов. Материальные объекты перед поступлением на склад контролируются и сортируются. Особое внимание уделяется сортировке крепежных элементов и палет, на которых транспортируются объекты производства, объекты и рабочие принадлежности. После поступления инструментов со склада на вспомогательных площадях осуществляется их подготовка, причем режущие пластинки устанавливаются в держатели, после чего в соответствии с требуемыми величинами допусков регулируются и контролируются их размеры с учетом величины упреждения их износа. На вспо-

могательных площадях собираются и контролируются палеты и крепежные элементы с объектами производства. Объекты производства, уложенные на палетах, перегружаются в системы межоперационного транспорта. Посредством транспортного оборудования объекты производства, инструменты и рабочие принадлежности транспортируются к производственным ячейкам. В состав производственных ячеек входят обрабатывающие станки с ЧПУ и центра для обработки объектов. Изготовленные объекты после контроля транспортируются посредством системы межоперационного транспорта в сборочные цехи или на склад. В сборочных цехах установлены сборочные машины или ячейки с роботами.

Управление такими комплексами, как правило, осуществляется на четырех иерархических уровнях, которые состоят из уровней: а) вычислительной машины пользователя; б) разработки групп (частичных) программ; в) распределения команд и сигналов, г) управления типа CNC. Уровень вычислительной машины пользователя является высшим. С помощью вычислительной машины пользователя можно редактировать программы, а также управлять обработкой информации, системой диагностики и распределительной сетью управления CNC. Она связана с терминалами пользователя.

На уровне распределенного управления осуществляется связь между вычислительной машиной пользователя и системой управления CNC. На уровне DNC можно получать информацию о состоянии производственного оборудования, а на уровне CNC обеспечивается управление данным оборудованием, получение на мониторе механических погрешностей и подача сигналов о необходимости проведения профилактики и т. п.

На показанных ниже примерах иллюстрируются типичные структуры гибких производственных комплексов различного уровня. На рис. 8.23 показана структура гибкой производственной системы, состоящей из портального робота, в рабочей зоне которого расположен двухшпиндельный обрабатывающий станок с системой управления CNC, инструментальные магазины и накопители объектов производства. На рис. 8.24 изображена гибкая производственная линия с линейным конвейером палет и пятью обрабатывающими станками, имеющими систему управления CNC. Составной частью линии является участок гермообработки и участок поверхностной обработки. Линия связана с системой автоматизированного транспорта с помощью автоматически управляемых тележек.

Управление гибкими производственными системами и системами производства от ЭВМ (CAM). Управление по осям перемещений станков и выполнение других функций в гибкой производственной системе осуществляется с использованием концепции системы DNC. Речь идет об относительно новой системной разработке управления, которая в отличие от старого понятия «прямое числовое управление» (Direct Numerical Control) называется «распределенное числовое управление» (Distributed Numerical Control). При прямом управлении

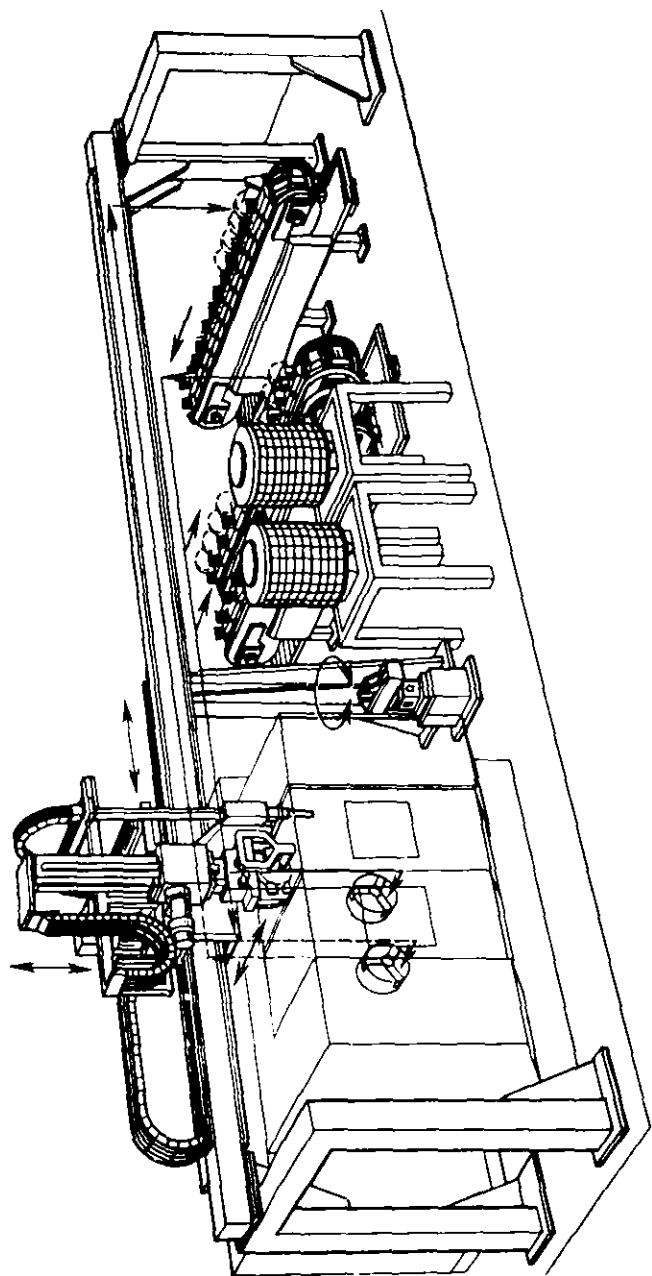


Рис. 8.23. Структура гибкой производственной системы для механической обработки

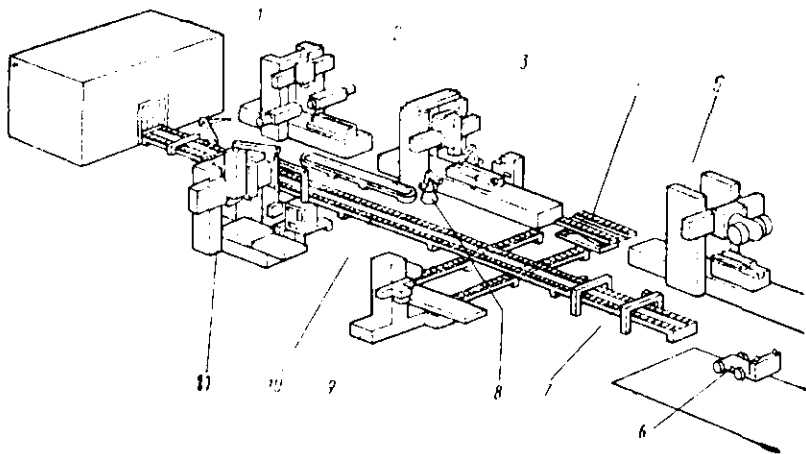


Рис. 8.24. Структура гибкой производственной линии для механической обработки: 1 – камера для обезжиривания и напыления; 2 – фрезерный станок с системой управления CNC; 3 – 5-координатный обрабатывающий центр с системой управления CNC; 4 – система изготовления палет; 5 – шлифовальный станок с системой управления CNC; 6 – транспортная система; 7 – индукционная закалка; 8 – роботизированная смена инструментов; 9 – сверлильный станок с системой управления CNC; 10 – конвейер для палет; 11 – координатный фрезерный станок

DNC управление большим числом станков осуществлялось от одной ЭВМ. При распределенном управлении DNC используется принцип управления каждым станком, роботом или другим каким-либо оборудованием от собственной ЭВМ (CNC).

Управление CNC вытеснило так называемые «проволочные логические схемы» (ЧПУ), которые применялись в старых программирующих автоматах. Системы CNC имеют более высокую производительность и объем памяти, а также более дешевы. К положительным особенностям относятся прежде всего возможность выполнения расчетов ускорения движения в реальном масштабе времени, проведение всех видов интерполяции, корреляция неточности и износа инструмента, автоматическая диагностика и т. п. В проработанной концепции управления CNC применяется больше современных элементов. Важен, например, переход от устройств считывания и перфоленты к переносным информационным носителям, какими являются гибкие диски. Записи на диски могут воспроизводиться и являются более точными и надежными. Ошибки в записи можно исключить без воспроизведения в управляющем модуле или системе.

С точки зрения современного управления DNC важны структура и автономность операций, управляемых на расстоянии. Централизация управления на более высоких уровнях происходит от простой, но в то же время высокопроизводительной мини-ЭВМ. Система управления кроме выполнения классических функций должна обеспечивать

возможность получения нескольких вариантов применения адаптивных методов и обратных связей многочисленных сенсорных устройств, используемых в производственном процессе. В том случае, если имеются отклонения от нормального процесса управления, требуется, чтобы система математического обеспечения обеспечивала быстрое проведение диагностики, быструю и эффективную остановку управляющих процедур. В то же время микропроцессоры, применяемые для управления роботами или обрабатывающими станками, имеют ограниченный объем памяти, низкий уровень технического интеллекта для обработки данных, поступающих от сенсорных устройств, для адаптивного управления и устранения ошибок в реальном масштабе времени. Поэтому одновременные виды деятельности нескольких вычислительных машин объединяют. Особое внимание следует уделить развитию математического обеспечения, применение которого приводит к тесной связи с операционными системами более высокого технического интеллекта, обуславливает большой объем памяти (оперативной и внешней), применению языков высшего уровня, а также периферийных устройств (редактирование текстов, неавтономные мониторы). Такую компоновку имеют только современные малые вычислительные системы.

Для отладки функций автономных операций с дистанционным управлением все компоненты системы должны быть пригодны для работы при посредничестве супервизора мини-ЭВМ. Между системой управления производственно-функционального формирования и высшим уровнем необходимо устанавливать устройство сопряжения (интерфейс) и при этом необходимо получить распечатку устройства связи. Данная распечатка с помощью мини-ЭВМ выполняет функцию монитора локальных функций, обеспечивает выбор программ или алгоритмов, которые должны выполняться на местном уровне, а также ввод и вывод данных. Каждая система управления оборудования должна быть программируемой на языке высшего уровня с целью оказания содействия функциям интерфейса.

Компоновка (разработка и операционное внедрение) управления DNC для систем с разной конфигурацией является значительно более сложной, чем компоновка одиночной системы. Речь идет о слаженной работе многих компонентов. Это — типичная задача для коллектива разработчиков, которые имеют более широкий кругозор и могут решить данную задачу от вопросов планирования до проявления высокого профессионализма в области электроники и техники связи.

Проблемы стали появляться, когда производственное оборудование не проектировалось в виде станков с ЧПУ или в комплекте с системой управления CNC для работы в сети DNC. В то время требовалось вмешательство в части аппаратных средств и математического обеспечения. Одним из применяемых способов является связь через окно устройства считывания с перфоленты. Можно изменять математическое обеспечение и формирование временной последовательности сигналов так, чтобы не перегружалась буферная память устройства контроля.

С этой целью необходимо знать распечатку и специальные признаки сопряжения, включая четность.

В случае сопряжения систем управления, которые имеют потенциально разные входы и распечатки сопряжения, необходимо иметь разные DNC-программы для поиска массивов данных постпроцессоров или проводить модификацию постпроцессоров, включая коррекцию операций при управлении DNC. Это все проблемы, которые нельзя решить при поставке; по вопросу их решения необходимо консультироваться в специальных центрах или решать их с привлечением собственного коллектива разработчиков.

Прямое распределенное управление в производственной системе перерастает в систему САМ. Система САМ определяется как эффективное использование средств вычислительной техники в области организации и управления производством, причем путем или прямого, или непрямого соединения вычислительной машины с техническими средствами и видами деятельности человека.

Основные виды применения системы САМ делятся на две основные категории:

1. Прямое применение, при котором ЭВМ используется или для мониторинга, или для непосредственного управления рабочими операциями.

2. Непрямое применение, при котором ЭВМ используется в качестве вспомогательного оборудования в производственном процессе, но при этом не существует никакой прямой связи между вычислительной машиной и производственным процессом. К непрямому применению ЭВМ относится управление производством (на уровне предприятия), подготовка с помощью ЭВМ управляющих программ, оформление заказов с применением ЭВМ и т. д.

Мониторинг и управление производственными процессами с помощью ЭВМ охватывает все прямые виды применения системы САМ. Вычислительная машина связана с производственными операциями. При этом исходят из того, что каждый промышленный или производственный процесс состоит из следующих компонентов: а) физический процесс, охватывающий механические компоненты (обрабатывающие станки, рабочие инструменты, индексирующие устройства и т. д.) и обрабатываемый материал (заготовки, химические реактивы); б) информационный поток. Для того чтобы можно было управлять рабочей операцией, необходимо обработать всю информацию, которая ее определяет (состояние производственного оборудования, параметры процесса, экономические параметры, число обрабатываемых объектов и т. д.).

Прямое управление от вычислительной машины делится далее на три категории: мониторинг процесса с применением ЭВМ, прямое числовое управление, контроль с применением ЭВМ (управление с использованием программы-супервизора).

Мониторинг процесса с применением ЭВМ означает, что вычислительная машина следит за процессом и связанным с ним оборудова-

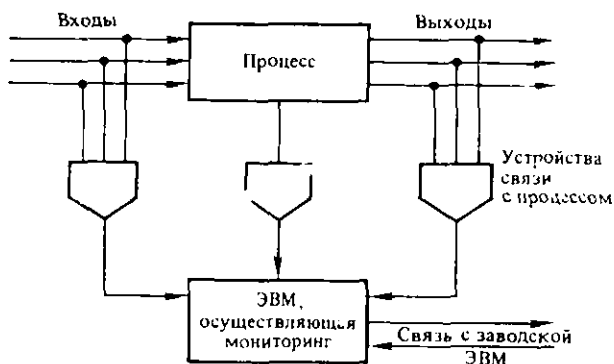


Рис. 8.25. Мониторинг процесса с применением ЭВМ

нием, а также осуществляет сбор и запись всех данных, поступающих из процесса. ЭВМ не проводит прямое управление процессом. Управление операциями и в дальнейшем базируется на деятельности человека, однако данные, собранные и обработанные вычислительной машиной, поступают в распоряжение оператора, поэтому они служат ему в качестве ориентира при управлении процессом. На рис. 8.25 показаны функции мониторинга производственного процесса. При этом происходит сбор трех видов данных:

1. Данные о процессе. Входные и выходные переменные процесса контролируются с той целью, чтобы в любой момент было известно общее состояние или ход выполнения операции. Если будет установлено, что параметры (переменные) процесса изменились по сравнению с теми, которые были перед этим получены в результате измерения как требуемые значения, то в этом случае ЭВМ дает сигнал оператору о том, что он должен внести коррективы в процесс.

2. Данные об оборудовании. Данные о состоянии производственного оборудования и рабочих принадлежностей могут быть весьма ценными, если требуется предотвратить поломку оборудования, оптимально использовать режущий инструмент и проводить диагностику причин поломки оборудования.

3. Данные об изделиях. Изготовитель часто фиксирует и хранит производственные данные и информацию об изделиях. Мониторинг процесса с применением ЭВМ является очень выгодным и для данных целей. Информация об объектах производства (количество, вид, производственные затраты, показатели качества) может быть полезна изготовителю и для собственных целей.

Сбор данных о производственном процессе может проводиться несколькими способами. Данные, поступающие из цеха, оператор может вводить в вычислительную машину вручную с помощью терминала, который расположен прямо в цехе. Сбор данных может проводиться и автоматически, причем различают, проводится ли последующая обра-

ботка независимо, т. е. иногда позже, или непрерывно, т. е. в реальном масштабе времени (в темпе поступления информации).

При аналоговом управлении производственным процессом регулирование проводится автоматически, без участия человека, причем каждая выходная величина появляется на экране монитора, а изменения проводятся по соответствующей входной переменной таким образом, чтобы выходная величина имела требуемое значение. Число таких контуров управления постоянно возрастает, так как производственные процессы становятся все более сложными. В крупных современных цехах число контуров достигает нескольких сотен.

Прямое числовое управление (DNC) заменило обычные аналоговые системы управления числовой вычислительной машиной, которая производит расчеты, позволяющие моделировать работу элементов аналогового управления и работает в реальном масштабе времени с данными, квантованными и по времени. Одна ЭВМ применяется для обслуживания большого числа контуров, поэтому она работает в режиме с разделением времени. Так как ЭВМ не проводит непрерывно мониторинг ни одного из параметров процесса, фиксируемые переменные периодически квантуются по времени с частотой квантования достаточно высокой, для того чтобы приблизиться к аналоговому восприятию сигналов. Основная конфигурация прямого числового управления показана на рис. 8.26.

При управлении от ЭВМ с использованием программы-супервизора вычислительная машина включена в производственный процесс с той целью, чтобы можно было оптимизировать некоторые функции или параметры выполняемого процесса и чтобы можно было достигнуть определенной поставленной цели. Данной целью могут быть производственные затраты, экономические данные и качество изделий.

Управление с применением программы-супервизора представляет собой более высокий уровень управления, чем прямое числовое управление, что видно из рис. 8.27. При прямом числовом управлении вычислительная машина связана с каждым контуром регулирования, для того чтобы осуществлять регулирование процесса. При управлении с применением программы-супервизора ЭВМ используется, чтобы определить, как управление в отдельных контурах управления должно проводиться с тем, чтобы достигнуть требуемой цели. Существует несколько стратегий, которые используют при управлении с применением программы-супервизора.

Кроме прямого применения вычислительных машин при мониторинге и управлении имеет место непрямое применение ЭВМ. Могут способствовать ЭВМ и выполнению рабочих операций. Если ЭВМ применяются с такой целью, то в этом случае они непосредственно не входят в производственный процесс. Следовательно, ЭВМ работает независимо и позволяет получать данные для эффективного управления производством. Данное непрямое управление при управлении производством может быть следующим. Планирование производства с применением ЭВМ связано с подготовкой производственных процессов,

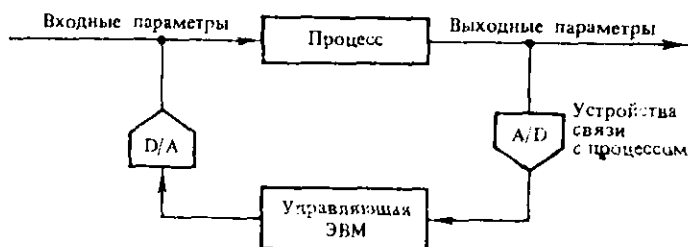


Рис. 8.26. Прямое числовое управление

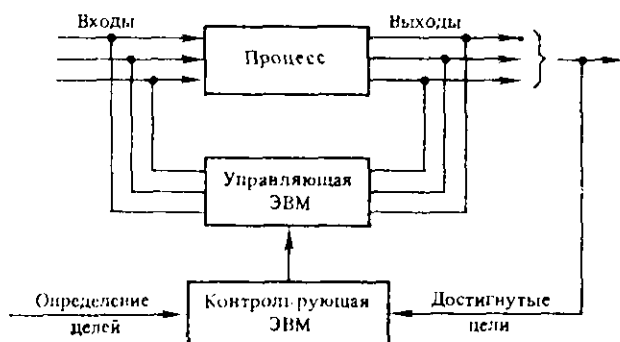


Рис. 8.27. Управление от ЭВМ с применением программы-суперанзора

которые содержат последовательность рабочих операций и запись производственного оборудования. Существуют многомашинные вычислительные системы, которые на основании классификации изделий, определяющей свойства изделия (геометрические размеры, форма, материал и т. д.), решают вопросы планирования производства. Иными словами, на основании определения изделия вычислительная машина определяет требования к рабочим операциям и их последовательности.

Подготовка управляющих программ с применением ЭВМ как составная часть системы CAD представляет собой следующий вид применения вычислительной техники в части оказания содействия подготовке производственного процесса. Разработано много систем автоматизированной технологической подготовки производства, особенно для станков с ЧПУ, которые на основании входной геометрической информации об изделии позволяют получать готовые программы механической обработки.

Следующий вид применения - разработка нормативов и инструкций по выполнению отдельных рабочих операций. Разбивка производства с применением ЭВМ позволяет найти наилучшее закрепление объектов производства за отдельными видами производственного обо-

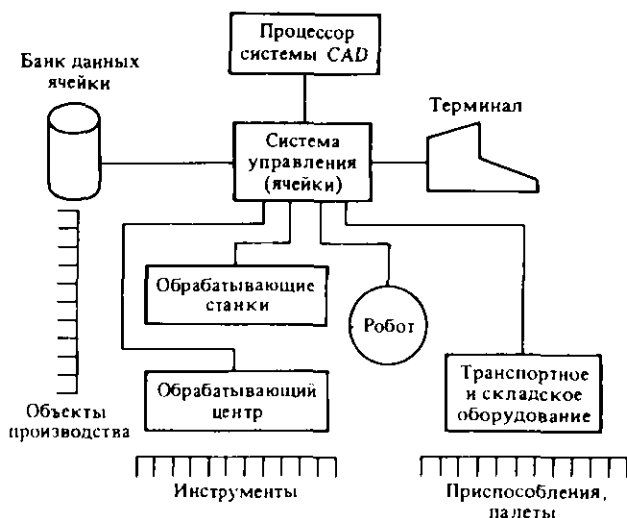


Рис. 8.29. Информационная связь системы CAD/CAM

нением ЭВМ могут быть разными и включать в себя подготовку производства CAD и само производство CAM. Часть системы CAD может быть реализована в виде системы коммерчески доступных компонентов аппаратных средств и математического обеспечения (например, в СЭВ -- АРМ: Автоматизированное рабочее место) для работы в режиме взаимодействия или для автоматизированных режимов работы. При конкретном интегрированном производстве с управлением от ЭВМ система CAD в информационном отношении связана с системой CAM (рис. 8.29). В структуре такого производства соответствующее внимание необходимо уделять системе управления, которая образует ядро системы CAM. Для систем типа CAD/CAM требуется:

- создать структуру, в которой надежно взаимодействуют дискретные функции в разных масштабах реального времени;

- выбрать и реализовать архитектуру вычислительных средств и информационной техники, которые обеспечат координацию функций.

С этой целью анализируются многие аспекты задач управления производством (прежде всего их взаимосвязи и иерархия отношений). Как правило, затем разрабатывается многопроцессорная структура, в которой используется дистрибутивная архитектура. Управление наряду с автоматическим производством деталей позволяет обеспечить соответствующую гибкость и возможность дальнейшего расширения его структуры.

Производственные ячейки и ГПС обеспечивают проведение операции обработки, которые инициируются на верхних уровнях. Сигналы с этих уровней имеют сходный характер, как, например:

«В соответствии с планом D изготавливаются серии $u_1, p_1, u_2, p_2, \dots, u_x, p_x$ деталей».

Сразу же после такой команды плановые рабочие функции начинают выполняться в соответствии с запрограммированными логическими операциями. Если операции запрограммированы без больших ошибок, требование будет выполнено своевременно.

При разработке системы управления должны быть известны все требуемые станки, инструменты, приспособления, захваты, данные, процессы, управляющие программы и т. п. В целом задачи системы управления таковы:

- преобразовать производственное задание в процесс и определить последовательность операций обработки деталей;
- преобразовать производственные процессы в управляющие алгоритмы;
- получить правильные последовательности действий механизмов машин или роботов;
- провести синхронизацию системы обрабатывающих станков и роботов с точки зрения требуемых производственных заданий;
- обеспечить мониторинг неисправностей путем считывания критических параметров производственного процесса;
- принять и обеспечить реализацию исключений путем контроля за работой ячеек производственной системы;
- реагировать на требование программы-супервизора системы управления к согласованной операционной информации;
- в случае неисправности или исключений применять алгоритмы контрольно-блокировочных действий;
- управлять станком на основе соответствующей управляющей программы;
- обновлять основной массив данных при возможных изменениях производства;
- применять станки с индивидуальным режимом работы при проведении ручных операций;
- проводить диагностику оборудования в соответствии с периодически действующей программой или в соответствии со специальными требованиями.

В большинстве случаев нет необходимости составлять подробный перечень функций на начальной ступени управления, особенно в том случае, если многомашинная вычислительная система достаточно гибка и обеспечивает применение дополнительных функций.

Для того чтобы производственная система могла эффективно работать в различных производственных ситуациях (текущее производство, изготовление первой детали, исключение манипуляций, ручное управление), соответствующие алгоритмы принятия решения и реализующие аппаратные средства (программно-аппаратное оборудование) должны иметь структуру дерева. Наиболее быстрый поиск соответствующей альтернативы идет в направлении к стволу дерева, а наиболее медленный — в направлении к корням данного дерева. Такая

структура наилучшим образом представлена в виде иерархической архитектуры.

Иерархическую функциональную декомпозицию можно получить путем применения дистрибутивной архитектуры, обеспечивающей направление сообщений конкурирующим и «сотрудничающим» многоуровневым системам задач. В настоящее время осуществляется управление и синхронизация работы обрабатывающих центров (2—5 осей) и роботов (4—6 осей).

Теория описания состояний и сеть Петри позволяют получить технические средства и инструмент представления многопроцессорной вычислительной системы. Образуют основной инструмент определения алгоритмов системы управления. Выгодно, когда управляющие программы разработаны для разных процессоров. Управление производственной системой от вычислительной машины, применяемой в системе САД, может проводиться только при наличии соответствующих данных. Эти данные формируются из обычных команд, из процессов обработки деталей и соответствующих файлов ЧПУ.

Мониторинг и адаптация проводятся непрерывно, учитываются данные сенсорных устройств и проверяются критические параметры рабочих операций. Если будет выявлена неисправность, устранение которой возможно, последовательный процессор перенастраивается на другой алгоритм перемещения деталей. Регулировка системы управления проводится в соответствии с конечным состоянием станка и робота. Если число сенсорных устройств небольшое, то и число возможных комбинаций неисправностей относительно мало.

Технологические процессы могут быть интерпретированы перемещением изготавливаемых деталей. Могут изображаться посредством языков структуры перемещений. Если деталь, перемещающаяся из накопителя, ожидает, пока освободится станок или робот, которые могут выполнять специальные операции, то в этом случае поток изделий можно моделировать с помощью теории массового обслуживания. Принимая во внимание то, что уже раз начатые на станке операции должны проводиться комплексно и совершенно надежно, алгоритм должен усилить двустороннее исключение и обеспечивать программирование, как правило, специальным способом. Последовательные задания зависят также от начальных команд всех заданий для различных процессоров. Данная последовательность может быть соблюдена согласно соответствующей схеме (оптимизированной или эвристической).

Выполнение важнейшей операции на станке должно быть синхронизировано с командами управления робота или командами управления манипуляциями деталей или инструментов. Сети Петри для описания асинхронного состояния позволяют применять данное внутрицикловое взаимодействие. В системы управления станка и робота поступают команды согласно инструкциям соответствующего языка. В алгоритм конечного состояния станка входит логика для крепления манипулируемых деталей и инструментов.

Многопроцессорная дистрибутивная архитектура, в которой вычислительная машина применяется совместно с многоуровневой операционной системой оповещения, записанной на соответствующем языке, наиболее часто применяется для работы в реальном масштабе времени при управлении производственными системами. Вопросы эмуляции многовариантных условий и передача сообщений, получаемых на этапе применения, представляют собой особую проблему. Представляется, что на применение сеток Петри при решении таких задач нельзя всегда полностью полагаться, и поэтому ищут новые решения. Вопросы развития и контроля решаются системой снизу вверх и вместе. Функции, которые комплектуются, охватывают управление станком и роботом, процессор производственной системы и процессор смежных инструментов.

При разработке математического обеспечения для спецификации модулей систем управления пропагандируется применение сетей Петри и теория конечных состояний. Применение сетей Петри при формировании синхронизирующих примитивов и в качестве базы управляемой системы данных не позволяет получить точные результаты. Недостаточно удовлетворительные решения существуют прежде всего в следующих случаях:

- автоматическая разработка алгоритма программирования производственного процесса обработки деталей при «составлении» структур программ и для выявления неисправностей;
- определение высших уровней принятия решения;
- проверка и контроль надежности работы в реальном масштабе времени.

Указанная выше методика разработки систем управления становится основным инструментом проектирования производственных систем. Наряду с вниманием, уделяемым применению сетей Петри, начинает изучаться и применяться методика, при которой используются Е-сети.

§ 8.7. СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Развитие управления производством с применением ЭВМ и внедрением гибких производственных систем выдвигает на первый план вопросы безопасности в областях взаимодействия «человек — станок» и «станок — станок». В этой связи разрабатываются системы безопасности, обеспечивающие проведение комплексного анализа рабочих ситуаций и предотвращение несчастных случаев. В области гибкой автоматизации, особенно на высших уровнях, системы безопасности имеют приоритетное значение, так как ошибки в программах и неисправности электроники могут стать причиной аварии и несчастного случая. Дополнительную опасность представляют движущиеся части станков и транспортные средства.

С точки зрения безопасности оператора идеальным является создание вокруг опасных мест закрытого пространства, однако это не исключает опасности, которая может появиться в результате ошибок в программе или неисправностей в электронных схемах, а также вследствие ошибок оператора. Часто нельзя отремонтировать систему без ее остановки.

Система безопасности, применяемая в автоматизированном производстве, должна обеспечить проведение вмешательства в зависимости от характера опасности, которая может появиться. Результаты работы такой системы используются в микро-ЭВМ, посредством которой анализируются критические производственные ситуации в реальном масштабе времени. Можно применять и управляющие ЭВМ системы. В случае соединения системы безопасности с управляющей ЭВМ возникают проблемы, связанные с надежностью, увеличивается время обратной связи, а также появляются трудности при разработке математического обеспечения. Математическое обеспечение системы безопасности не должно приводить к сокращению производства и мер безопасности. Поэтому рекомендуется разделение вычислительных машин системы управления и системы безопасности.

Основные характеристики системы безопасности при гибкой автоматизации:

1. Более высокая безопасность. К системе предъявляются требования, согласно которым она должна сигнализировать о неисправностях и их устранять. В крайних случаях ее подсистемы должны создать такие условия, при которых будет обеспечена локализация опасности.

2. Эффективная защита. Для такой защиты требуется, чтобы система могла различать и классифицировать все опасные ситуации. Должна обеспечивать принятие быстрых и эффективных мер, которые позволят устранить возникшую опасность, причем с наименьшим влиянием на производственную систему. Должна обеспечивать:

- распознавание входа лиц или объектов в запрещенные зоны;
- предвидение последствий экстремальных ситуаций;
- проверку, являются ли вмешательства и входы в производственную систему заданными и можно ли ими управлять;
- принятие соответствующих мер с целью устранения опасных ситуаций;
- проверку устранения опасных ситуаций;
- сообщать человеку, осуществляющему надзор за работой производственной системы, о возникающей ситуации.

3. Возможность отсоединения подсистем производственной системы. Система должна уметь воспринимать информацию об изменении заданных условий, особенно о снижении степени безопасности (например, при наладке, ремонте и т. п.). Должна уметь сохранять новый уровень безопасности.

4. Фиксирование опасных ситуаций. Речь здесь идет не только о простой их регистрации, но и о превентивном анализе причин возникновения опасных ситуаций.

5. Объединение с «производственной» ЭВМ. Данные функции не могут быть исключены в ограниченной мере. Требуется определенное вмешательство, которое не должно влиять на функции управления производством. Такими функциями вмешательства могут быть: сигналы тревоги, выключение станков, пуск и т. п. Однако некоторые виды вмешательства, как, например, снижение скорости рабочих органов, не могут быть выполнены без диалога защитной и управляющей ЭВМ.

У рабочих ячеек с промышленным роботом применяются решения со шлагбаумом. При таком решении система может распознать опасность и опустить шлагбаум или закрыть входные двери в пространство, где возникла опасная ситуация. Система может закрывать двери в каждой рабочей ситуации.

Более сложная система безопасности состоит из нескольких устройств. Важным является устройство сопряжения с объектами, окружающими производственную систему. В общем случае производственная система состоит из группы станков (станки с управлением CNC, роботы, транспортные системы и др.). Каждый из них имеет управление от микроЭВМ, сопряженной с ЭВМ более высокого ранга, которая осуществляет управление ими как единой системой. При логической связи управляющей и защитной системами существуют ограниченные возможности вмешательства со стороны защитной системы.

Принцип работы системы безопасности показан на рис. 8.30. Информация о состоянии окружающей среды (ситуации внутри производственной системы) с помощью устройства сопряжения идет в защитную вычислительную машину. Если возникнет опасная

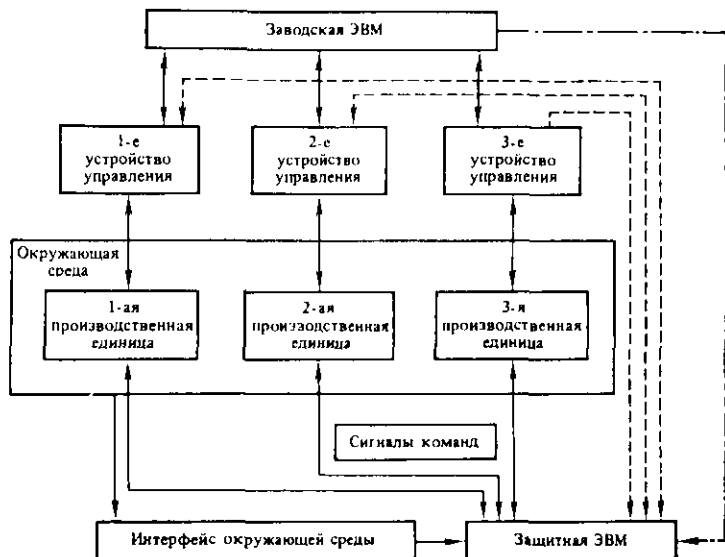


Рис. 8.30. Структура системы безопасности

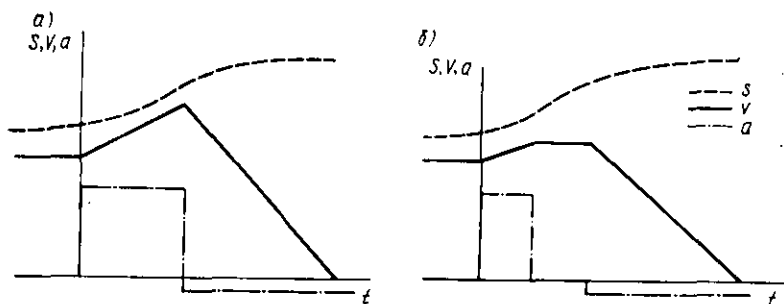


Рис. 8.31. Зависимость скорости, ускорения и расстояния от времени поломки до остановки

ситуация (неправильное вмешательство человека, коллизия станков), защитная ЭВМ отыскивает способ исключения соответствующего сигнала узла станка и выключает его. Логическая линия включает в себя и устройства управления. Может быть также прямая связь между устройствами управления и защитной ЭВМ или связь с ЭВМ более высокого ранга.

Вмешательство низшего уровня, когда имеет место вмешательство в кинематическую схему, бывает без выключения станка, что проводится при первых же признаках опасности. Если такие признаки сигнализируют о возможной аварии, станок выключается. Потенциально опасность сильно зависит от времени реакции.

Современные системы безопасности обеспечивают более высокую операционную гибкость, однако требуют больших капитальных вложений. Для систем безопасности с ЭВМ требуются «интеллектуальные» управляющие программы, а интерфейс их окружающей среды реализуется весьма сложно. В системе используются актуальные сведения о динамических ситуациях каждого объекта в рабочей зоне и ограничениях в операционном пространстве.

Наиболее простую модель управления системой защиты можно представить в виде точки с одной степенью свободы, которая движется по прямой (рис. 8.31). Если v — скорость движения в момент потери управления, a — максимальное ускорение, R — максимальное время вмешательства системы, d — минимальное замедление, гарантируемое системой, то потом время остановки в наименее благоприятном случае будет

$$s = vR + aR^2/2 + (v + aR)/(2d).$$

При условии, что скорость в интервале R меньше, чем максимально достижимая, или если $v_{\text{макс}}$ меньше, чем скорость, которую можно достигнуть за время R с ускорением a , то тогда время s будет:

$$s = \frac{v(v_{\text{макс}} - v)}{a} + \frac{(v_{\text{макс}} - v)^2}{2a} + \frac{v_{\text{макс}}R - (v_{\text{макс}} - v)}{a} + \frac{v_{\text{макс}}^2}{2d}.$$

что можно представить в виде соотношения

$$S = \frac{v_{\text{макс}} R + v_{\text{макс}}^2}{2d} - \frac{(v_{\text{макс}} - v)^2}{2a}.$$

Из приведенных выше соотношений вытекает путь к получению системы с техническим интеллектном через снижение максимального времени R вмешательства системы до того, как произойдет вмешательство в снижение скорости станка. У современных систем безопасности время реакции составляет 50 мс.

Механические датчики непригодны для использования в системах безопасности, поэтому применяются оптические и микроволновые сенсорные устройства. Выбор вычислительной машины зависит от размеров и сложности системы. Требования к такой машине можно представить в виде следующих параметров: высокая скорость и малое время реакции, необходимость диагностики неисправностей и неверных функций, возможность оперирования несколькими модулями, быстрый ремонт или замена неисправных элементов. Для интерпретированного описания решения системы безопасности требуется творческое применение для конкретных случаев.

§ 8.8. СОЗДАНИЕ ЗАВОДОВ БУДУЩЕГО

Важнейшим признаком изменений, происходящих в области производства, является проникновение информационных технологий в структуру современных предприятий. В этой связи центр тяжести инноваций на пути к созданию завода будущего зависит от развития информационной техники и ее объединения с производственным оборудованием. Перед классическими технологиями стоят новые возможности перехода к более высокому уровню на базе использования информационной технологии. Более высокий инновационный потенциал вытекает из возможности разработки интегрированных вариантов структуры и конфигурации заводов. Человек, информация и производственные технологии объединяются в законченную систему, сосредоточенную в минимальном пространстве. Это оказывает влияние и на развитие инженерного труда, который должен выполняться на базе системных подходов с применением средств вычислительной техники (CAD).

Первоначальное внимание при разработке проекта завода будущего нельзя концентрировать только на параметрах, которые в производственных комплексах достигаются как результат стремления приблизиться к абсолютным физическим пределам — скорости, низкой или высокой температуры и т. п. Преодоление таких барьеров относится к доменам процессологических дисциплин (материальная, динамическая и информационная процессология), сведения в области которых отражаются на качестве модулей и компонентов автоматизиро-

ванного производства. Использование процессологических дисциплин имеет прежде всего оптимизирующее значение, в то время как проблема создания полностью автоматизированного завода является прежде всего системологической проблемой (анализ и синтез структур и параметров с целью получения нового качества). В системологии при анализе и синтезе применяются прежде всего теория и методы декомпозиции и рекуррентного синтеза, а при предвидении применяются итеративные алгоритмы.

В системологических набросках завода будущего во внимание принимаются пять аспектов: функции и их носители, пространство, алгоритмы, организация и человек. Основываются на системной интеграции функций и на технических средствах и математическом обеспечении, которые обеспечивают их выполнение (рис. 8.32). Конечные состояния процесса интеграции функций на первом этапе концентрируются в виде трех полных систем:

1. *Система инженерного труда.* Интеграция здесь обеспечивается путем информационного объединения парциальных систем CADD (конструирование и черчение) и CAPP (подготовка процессов) в законченную систему CAD (подготовка производства).

2. *Система производства.* Характеризуется структурированием и иерархизацией уровней управления. С помощью информационного и материального потоков функции производственного оборудования складов и транспортных систем формируются в законченную систему.

3. *Система операционного управления.* Включает в себя частичные системы сбыта, определения мощностей, покупки, производственного планирования и распределения, мониторинга и операционного управления.

Системы производства и операционного управления на последней стадии интегрируются в систему САМ (управление производством). На конкретных моделях составляются проекты различных интегрированных блоков как с точки зрения количества, так и с точки зрения содержания выполняемых функций.

Проектированию заводов будущего всегда предшествует разработка прогноза, на основе которого составляются (формируются) догадки (антиципации). Для проведения соответствующей работы целесообразно составить сетевые графы. Сетевой граф может иметь вид согласно рис. 8.33. Разработку проекта полностью автоматизированного завода можно разделить на несколько этапов, например:

- прогнозирование уровня компонентов завода, особенно их параметров. Здесь требуется сформулировать качественные признаки и провести экстраполирование временной характеристики совершенствования параметров;

- определение необходимого уровня компонентов. На данном этапе должна быть установлена прежде всего физическая и информационная совместимость компонентов для подкомпонентов и модулей. Ясной должна быть и структура их составления, а также входные и выходные параметры;

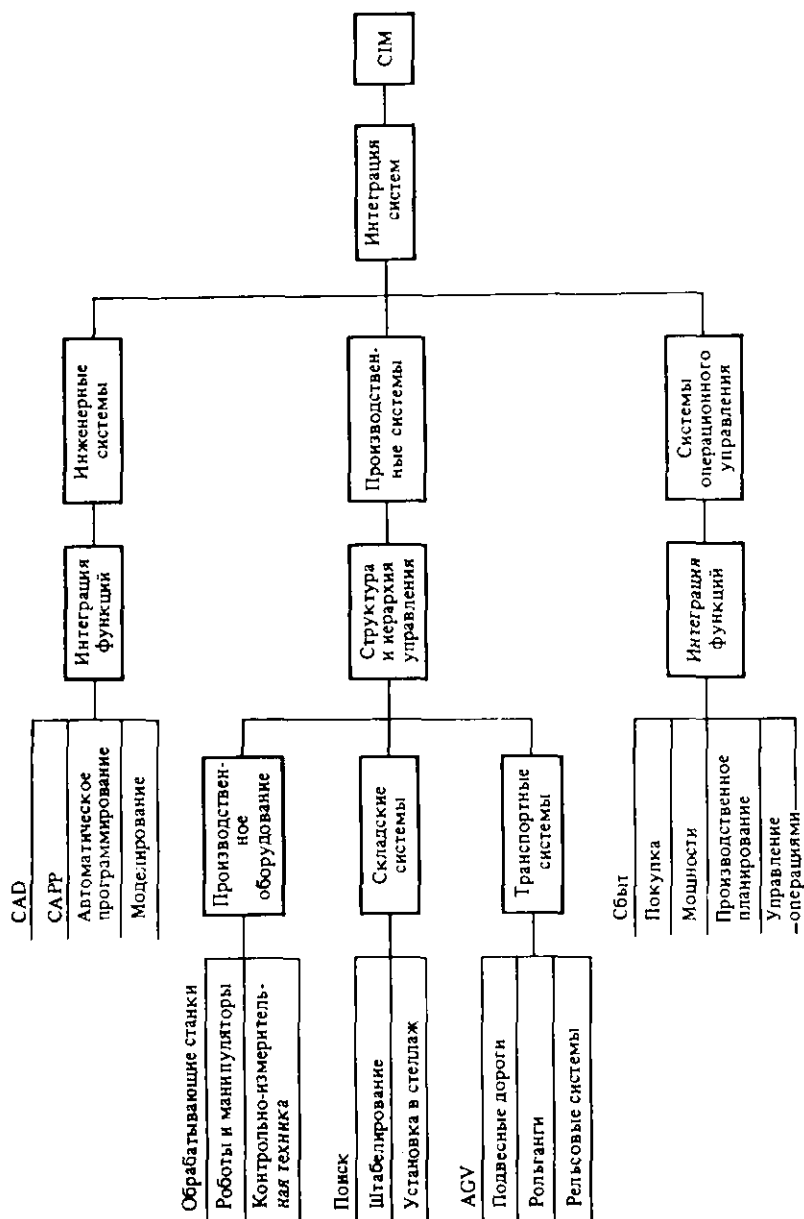


Рис. 8.32. Системная интеграция функций, оборудования и математического обеспечения у заводов будущего

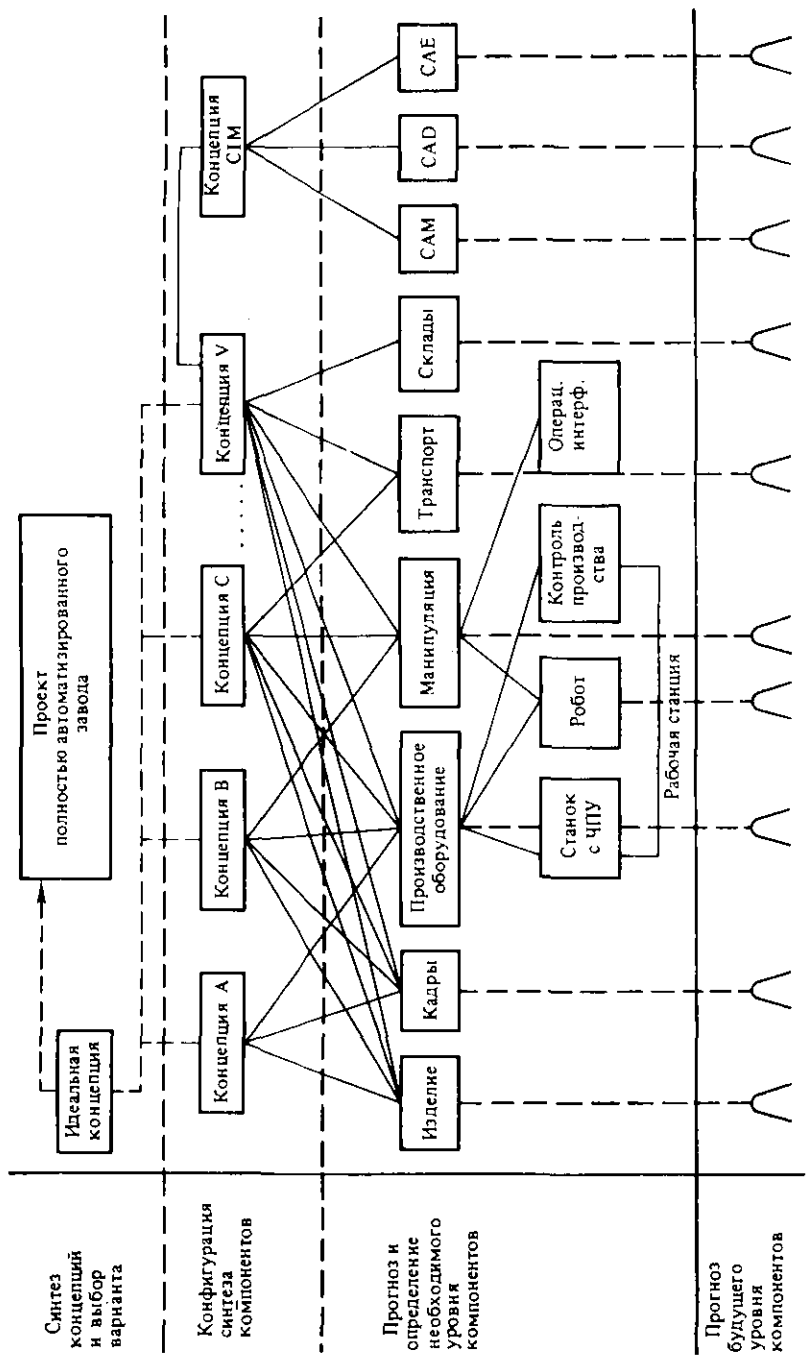


Рис. 8.33. Сетевой граф работ на полностью автоматизированном заводе

— разработка проектов конфигурации систем. Можно получить несколько вариантов конфигурации. От параметров компонентов зависит качество вариантов синтеза. Решающим фактором здесь является доступность материальных единиц с точки зрения времени и затрат;

— системное рассмотрение вариантов проектов, от которого зависит выбор варианта. Выбирается наиболее выгодный с точки зрения времени и затрат вариант. Предполагается, что вариант всегда является реализуемым.

Основа решения базируется на прогнозе и определении уровня компонентов. Разработка прогноза и планирование параметров компонентов проводятся ко дню начала установки оборудования. Важно здесь различать интенсивные и экстенсивные пути достижения цели (рис. 8.34). Экстенсивные пути существенно снижают вероятность

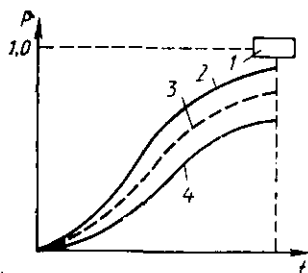
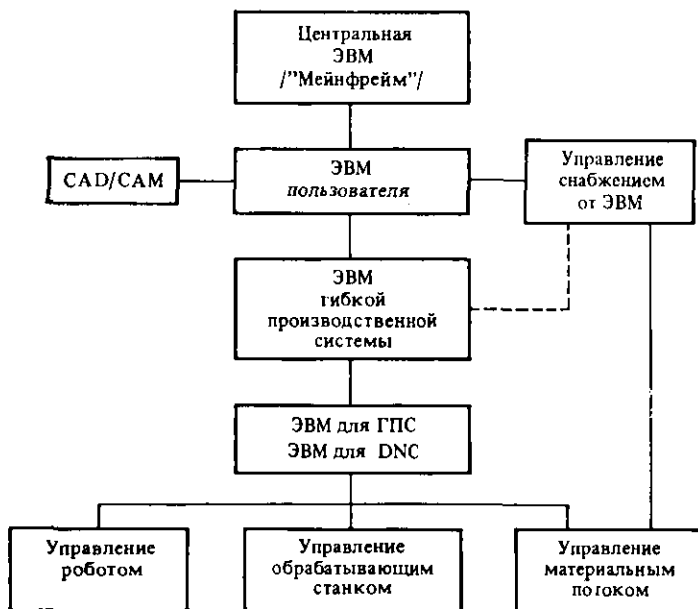


Рис. 8.34. Экстенсивные и интенсивные пути достижения цели:

1 — цель; 2 — интенсивный подход; 3 — модус; 4 — экстенсивный подход; t — время; P — вероятность достижения цели

Рис. 8.35. Схема структуры управления и интегрирования ЭВМ на заводах будущего



приближения к цели. Они обуславливают возникновение проблем и часто приводят к аннулированию работ, выполненных большим числом проектных и производственных организаций.

У завода будущего (СІМ) охватывающая его система управления основывается на системах сопряженных вычислительных машин, управляющих производством, его подготовку и выполнение административных функций. Развитие в направлении данной высокой степени интеграции идет достаточно медленно. Компьютерная интеграция производства (СІМ) представляет собой концепцию АСУ, построенную по признаку сверху вниз, в которой применяется большая центральная ЭВМ для проведения бухгалтерского учета и финансирования, причем ее функции распространяются на административную область, учет, снабжение, она также интегрируется с системой управления производством на уровне цеха. Используется при разработке производственных ячеек и гибких производственных систем. Оправданной базой для СІМ является иерархическое управление небольшим цехом. Исходный проект упорядочения вычислительных машин для СІМ показан на рис. 8.35. В соответствии с данной схемой речь идет об абстрактной сопряженной системе, состоящей из нескольких ЭВМ, и коммуникационных связях между ними.

Пока еще существует мало таких проектов СІМ, которые бы имели ясную и подробную концепцию структурирования. Основным всеобъемлющим аспектом является создание всеобщей информационной системы, которая включала бы в себя стандартные языки и методы. Кроме всеобъемлющей формы здесь еще существуют частичные информационные формы, которые имеют собственные системные и информационные базы данных. Барьером на пути к быстрому сопряжению информационных потоков для СІМ является прежде всего большое время переноса данных от малых вычислительных устройств большим вычислительным машинам. Для переноса данных конструкторской документации от малой ЭВМ, находящейся в проектном центре, к большой вычислительной машине требуется примерно два часа. Результаты проектирования и проверки изделий хранятся в большой центральной вычислительной машине, здесь также разрабатываются стандартные инструкции по проектированию. Понятно, что для такого решения требуется создание банка данных для проектирования (САД).

Большую проблему в области управления будущих производств представляет интерфейс САД/САМ. Разрабатываются специальные протоколы САМ. Прямой перенос данных из системы САД в САМ не является нерешаемым, однако открытым вопросом является банк данных. Опыт показывает, что для решения этой задачи необходимо длительное время. Так, например, фирма «Тосиба» указывает, что потребовалось 30 человеко-лет для разработки и внедрения 10 комплектов программ на магнитных дисках общим объемом 3 Гбайт. Данной фирме удалось разработать 25% программ по проектированию, 50% производственно-управляющих программ, а также внести в банк данных около 70% данных контрольного характера и 40% — производ-

ственного. Однако данные для проектирования и чертежная документация хранятся отдельно от данных по производству и управлению. Часто расстояние между объектами велико (до 200 км), велик и объем переносимой информации.

Многомашинные информационные системы хранят данные для управления, снабжения, мониторинга производства и управления станками. Операции по переносу осуществляются отделом производственного диспетчера, который информирует участок снабжения о требуемых заготовках и материалах. Данные от этого участка поступают в центральную ЭВМ и от нее в отделы. Отделы снабжения могут предоставлять для производства информацию об ожидаемых поставках материалов. Диспетчерское управление на уровне цеха позволяет получать данные о состоянии производства, особенно путем мониторинга результатов завершённой работы. Каждый цех позволяет получать обратную информацию. В качестве эффектов функционирования таких систем указывается возможная экономия труда цеховых мастеров на 40% и операторов на 10%. Для совершенствования математического обеспечения и оборудования требуется создавать производственные и исследовательские лаборатории нового типа.

В области развития коммуникаций предпочтение отдается распределенной архитектуре вычислительных машин в сравнении с архитектурой центральной вычислительной машины. Это объясняется тем, что система центральной вычислительной машины чувствительна к ожиданию при переносе. ЭВМ пользователя и система CAD могут быть связаны посредством локальной сети с пунктом управления цеха, а также со станками и производственными единицами.

Применяется несколько видов трансляционных сетей. Как правило, от ЭВМ пользователя еженедельные графики поступают в пункт управления производством, который подготавливает суточные графики. Операторы производственных ячеек принимают решение об очередности изготовления деталей после получения этих графиков.

Серьезной проблемой является комплектование банка данных САЕ. Для ее решения требуется информационное сопряжение данных, получаемых на разных участках административного управления. При создании САЕ приходится сталкиваться с тем обстоятельством, что вычислительные машины являются недостаточными большими для комплексной обработки массива данных. Одновременно крупные ЭВМ, применяемые в производстве, и при большой скорости могут израсходовать свой фонд времени на считывание файлов и распределение данных. Наиболее крупная и весьма комплексная проблема заключается в том, как распределять и хранить данные более чем тысячи различных компонентов. Математическое обеспечение должно позволять проводить коррекцию данных, необходимых для системы CAD. По оценке крупных фирм (например, «Тосиба»), для создания базы данных САЕ для компьютерной интеграции производства (СІМ) требуется 10—20 лет. Инженерно-техническими работниками пока еще не проработаны идеи и особенно методы по данному вопросу. Однако существ-

вуют планы, которые уточняются, как преодолеть данное препятствие, хотя внимание в последнее время концентрируется на создании раздельных систем CAD и CAM. Примером является проект фирмы «Тосиба Кейхин» (рис. 8.36). В структуру CIM, согласно этому проекту, входит банк данных CAE, представленный семью видами файлов, система сетевой связи CPU для проектирования, управление производством и станками, контроль и техническое обслуживание. В структуру также входит система взаимодействия CAD с локальным банком данных и CPU по планирова-

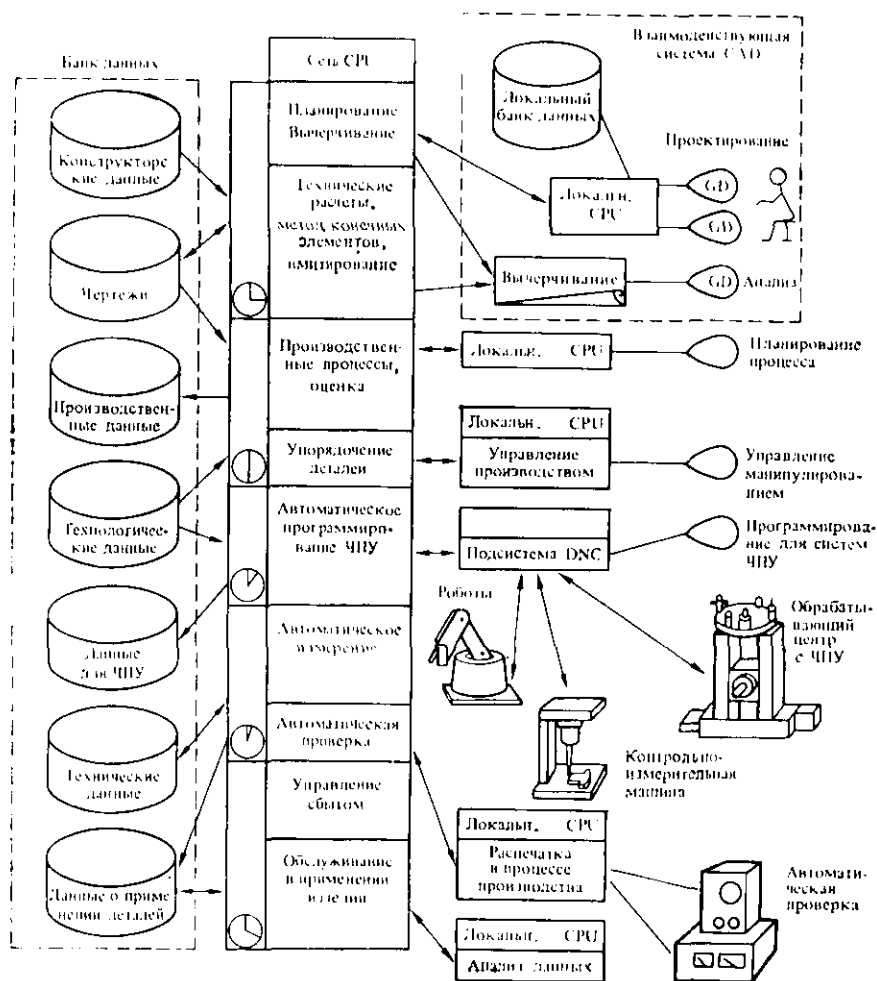


Рис. 8.36. Проект компьютерного интегрированного производства (CIM) фирмы «Тосиба Кейхин»

нию и устройствам программирования. Уровень производства включает в себя локальные CPU прямого числового управления (DNC) обрабатывающими станками, роботами и измерительной техникой. Локальные CPU предназначены для проверки и анализа производственных систем. Производственную систему проверяет лаборатория автоматизации. Внимания также заслуживает проект фирмы «Хита-чи» (рис. 8.37), в котором применяется интерфейс, называемый «Field-net» категории MAP.

В последние 10—15 лет в мире было разработано огромное количество разных материалов (главным образом нормативов, руководств по ручному выполнению различных видов работ, чертежей, методов, а также программ), которые часто носили несбыточный характер, теряли свою актуальность и были неточными. При разработке интегрированных технологий требуется провести рационализацию систем данных и их обработки, а также применять в виде комплексов вычислительных средств и информационную технику. Ожидаемые виды эффектов очевидно будут иметь синергический характер.

Предпосылкой заводов будущего, очевидно, являются островки автоматизации, системно сопряженные в виде функциональных блоков. Дальнейшее совершенствование таких островков необходимо регулировать с учетом перспективы, стремиться к управлению информацией и ее надежной передаче от места к месту. Специалисты считают, что заводы будущего будут иметь три уровня связи типа локальных сетей:

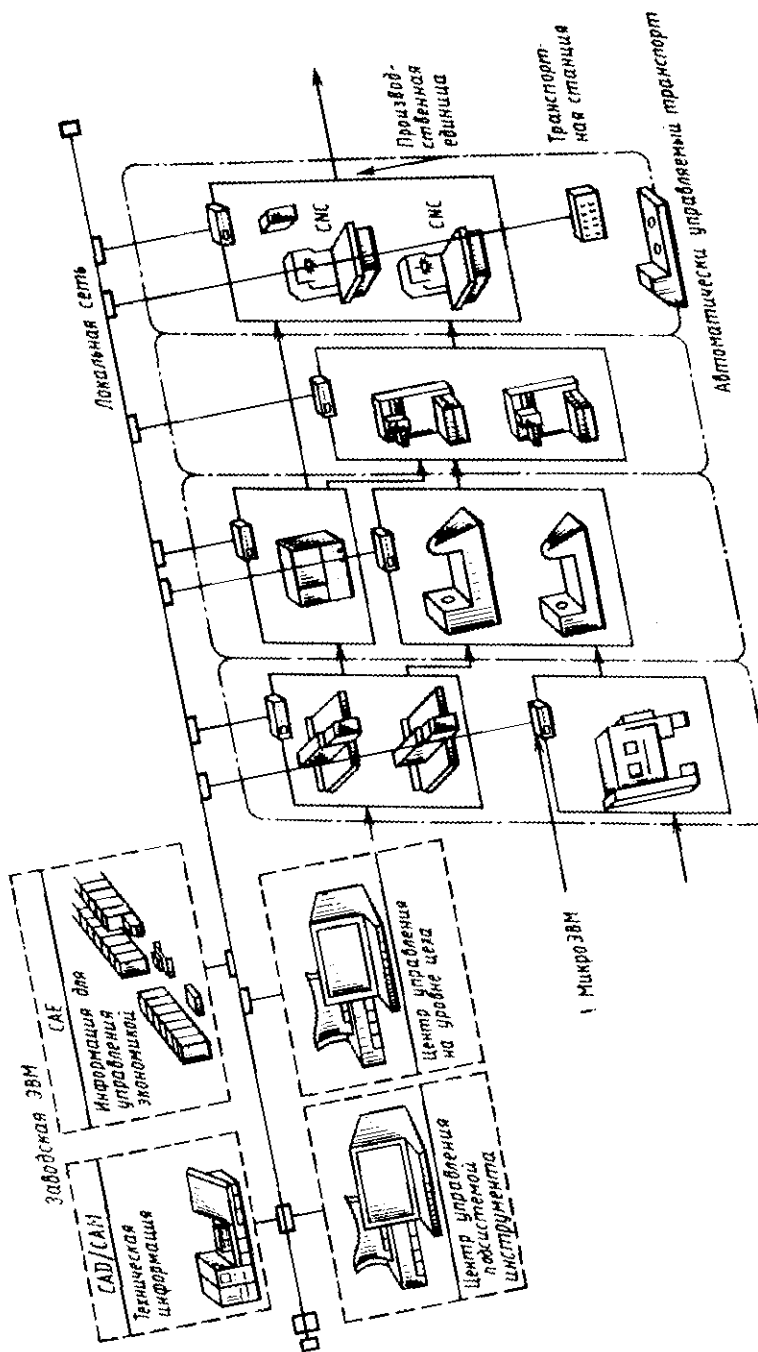
1. Полностью интегрированные сети, связывающие вычислительные средства и системы инженерных и производственных участков.
2. Локальные сети, обеспечивающие связь между участками.

Так эти сети связывают производство с подразделениями, осуществляющими его подготовку. Могут быть также сети, которые связывают производственные ячейки с операциями планирования.

3. Сети, применяемые на уровне производственных площадей, связывают обрабатывающие станки, оборудование для манипуляции, роботы, системы управления и т. п.

Данные сети различаются не только объемом сопряженных компонентов, но и другими признаками. Важна, например, скорость переноса. Сети первого уровня оперируют при скоростях 4,8—5,6 кбит/с. Представляется, что в большей скорости нет необходимости. Такая сеть обеспечивает информационный поток «завод — предприятие — производственно-хозяйственное объединение» и т. п. Посредством данных сетей осуществляется перенос больших объемов информации, максимально два-три раза в день. С их помощью происходит перенос временной и совершенно надежной информации, подтверждающей различного рода сообщения. В настоящее время пока еще практически не существуют когерентные сети.

Сети второго уровня объединяют другие сети и устройства технического интеллекта. Данные сети реализуют путем установления связи между инженерными и цеховыми подразделениями. Наиболее известна сеть типа «Этернет», при которой все участники имеют одинаковые



права в отношении доступа к ресурсам, одинаковые по отношению друг к другу подходы, независимые виды операций и строго соблюдают правила (протоколы) всей системы.

Сети типа «Этернет» широко применяются, хорошо подходят для соединения оборудования в каком-либо месте без длительных процедур. Перекрывают участки информационного обмена в том случае, если необходимо проводить сбор или обработку данных. Такие сети должны иметь несколько свойств (правила МАР), таких, как высокая надежность, возможность интегрирования сообщений, гарантированное подтверждение каждого сообщения, возможность применения при пиковых нагрузках, кабели, используемые для переноса, могут применяться в условиях цеха и нечувствительны к электрическим шумам.

Сети третьего уровня в настоящее время наиболее разработаны. Они интегрируют оборудование друг с другом. Подобная интеграция необходима прежде всего для связи между производственными ячейками. Расходы, связанные с такими сетями, не должны быть высокими, так как сети изменяются в соответствии с изменением цехового оборудования. Оборудование локальных рабочих сетей требует строгого соблюдения стандартов в области связи данных. В условиях производства без таких стандартов обойтись нельзя. Коммуникационные стандарты приводят к информационной совместимости отдельных видов оборудования. Они очень важны при управлении функциями рабочих сетей, особенно по следующим аспектам: коррекция ошибок и перенос информации к оборудованию (какие виды оборудования должны информацию получить, какие существуют приоритеты и кто управляет отделами).

В области коммуникационных стандартов необходимо ориентироваться на стандарты ИСО, особенно на стандарты ОСИ (Opened System, Interconnect'). Однако данные стандарты полностью не определены. На уровне цеховых площадей необходимо строго соблюдать управленческие временными последовательностями. Производственное оборудование должно быть синхронизировано по отношению друг к другу.

Технологические решения завода будущего позволяют изготавливать общемашиностроительные изделия или их части с технологическими ограничениями и ограничениями по массе согласно соответствующей структуре обрабатывающих станков и оборудования, сборочного и транспортного оборудования, массе и качеству исполнения отдельных видов изделий. Производственно-технологический режим работы должен быть трехсменным. Часть первой смены отводится под наладку или техническое обслуживание и ремонт оборудования.

Пространственная компоновка завода будущего характеризуется следующим. Служебные помещения расположены в высотных надстройках. Цехи, в которых применяются тяжелые станки и оборудование, имеют прочный фундамент и находятся на первом этаже. Сборка легких по массе изделий проводится на следующих этажах. Новым элементом здесь является расположение служебных помещений вблизи производственных площадей. Близко друг к другу располагаются и

производственные площади, что приводит к сокращению занятых площадей и повышению общей полезности площадей. В некоторых случаях близкое расположение производства заготовок и деталей может быть проблематичным. Близко поэтому располагаются только механические и сборочные цехи. На территории завода находятся также спортивные площадки и места культурного отдыха коллектива. Производственные и информационные потоки являются симплексными и функционируют в сопряженных режимах.

Производственный поток характеризуется применением новых технологий обработки материалов и базируется на подготовительных площадях и станциях. Внутризаводской транспорт связан с транспортной сетью общего назначения (связь завода с его системными окружающими объектами).

На заводе-автомате после деления материала отдельные заготовки укладываются на платформу транспортного оборудования и контролируются автоматизированным контрольно-измерительным оборудованием по трем основным размерам. Данные о форме заготовок сравниваются с требуемыми параметрами, после чего отдается команда об их отправке (или отделении бракованных объектов производства). Фактическая форма заготовок учитывается в технологическом банке данных об объекте производства, после чего принимается решение об оптимальном виде производства деталей. Стружка, образующаяся при делении заготовок лазером, при точных режимах отводится в поддоны для отходов под действием гравитации и дополнительных сил. Ввиду точной формы заготовок отходы минимальны. Они вывозятся автоматически направляемыми тележками-самопогрузчиками.

В случае черновых операций на заводе чаще всего применяются операции механической обработки на станках и оборудовании нового типа, прежде всего на базе высокопроизводительных фрезерных или расточных станков, которые обеспечивают получение новой формы машиностроительных деталей (различные разгружающие отверстия, отверстия для динамической балансировки, сверхточные направляющие поверхности и поверхности скольжения). Предполагается снижение трудоемкости токарных операций.

После черновых операций применяются неклассические технологии, обеспечивающие упрочнение поверхностей трения и скольжения в результате термохимической или физико-механической обработки, или путем нанесения различных покрытий с целью сохранить вязкость и уменьшить твердость ядра сечения детали, а также сохранить износостойкость и точность размеров и формы поверхности. Обработка деталей более сложной формы, таких, как шатуны, коленчатые валы и т. п., будет проводиться в цехах объемной обработки давлением с применением управляемых по программе типовых инструментов или их будут получать сваркой из более простых фасонных деталей. Относительно редко будет применяться листовая сталь и с целью ее замены будут использоваться пластмассовые кожухи и крышки. Их

производство обеспечит цех пластических материалов, а формование будет проводиться в металлических формах.

Составной частью завода является также цех по производству композиционных материалов, где в больших мешалках контейнерного типа подготавливаются композиционные смеси (керамические, пластмассовые и металлические), а также подготавливаются решетки (металлические и пластмассовые) для внутренней арматуры спроектированных деталей. Процесс литья будет проводиться в металлических формах и, вероятно, только при больших объемах производства и стандартных деталях. Металлические формы производятся в соответствующем цехе.

Работа сборочного цеха базируется на принципах групповой технологии. Там происходит сборка узлов и групп, например посадка валов в подшипники, насадка уплотнительных колец и т. п. Сборочные участки снабжаются деталями, поступающими из механического цеха и с центрального склада, с которого поступают все кооперированные детали, стандартные детали, подшипники, уплотнения, соединительные материалы и т. п. После окончания сборки на автоматизированном участке проводится ее контроль.

Упаковка готового изделия многовариантна, причем она может проводиться или для оперативной отправки заказчику в транспортных поддонах контейнерного типа, или для отправки на склад готовых изделий в консервирующих поддонах. Предполагается прямая связь внутризаводского транспорта с распределением изделий заказчикам. При разработке заводов будущего требуются новые подходы к их проектированию.

Применение традиционных форм и классических методов опирается о созданные системы предпроектной и проектной подготовки.

При проектировании конкретных производственных систем исходят прежде всего из опережения необходимой гибкости производства. Конфигурация такой системы с точки зрения структуры обрабатывающего оборудования, средств манипуляции, информационной техники и средств управления должна соответствовать расчетам ее пропускной способности с учетом требуемой гибкости и может изображаться в виде соответствующих пространственных решений. Трудности заключаются в том, что при проектировании нескольких конфигураций затрачивается много времени. Применение вычислительных машин при проведении такой работы пока еще не дает достаточного эффекта. Многообещающими являются моделирующие системы, в которых применяется мультиплицированное проектирование.

Наиболее серьезной проблемой является решение дилеммы о доступности новой техники (роботы, периферийные устройства, интерфейсы, операционные процессы и т. д.) и экономической оценке конкретного варианта. По этой причине представление о конфигурации системы не разрабатывается в виде требуемой документации до тех пор, пока не будет рассмотрена целесообразность решения и сформу-

лированы способы его доработки. При рассмотрении целесообразности опираются на анализ и общую оценку конфигурации. В ходе анализа прежде всего определяется продолжительность цикла и другие затраты времени, в результате чего получают представление о времени производства для каждой совокупности изделий. Это является предпосылкой проведения стоимостного анализа, в ходе которого решается вопрос экономической выгоды и целесообразности реализации системы.

Методика, основывающаяся на принципе «проектирование --- анализ --- реализация», должна применяться повторно итеративным способом. Использование итераций позволяет получить хорошие результаты, так как приводит к появлению в системе новых элементов и может указать на резервы улучшения.

При проектировании крупного комплекса целесообразно учитывать большое число потенциальных решений на всех уровнях. При применении в процессе проектирования вычислительной машины (CAD) решение постоянно уточняется. В результате этого риск возможного неиспользования процедуры уменьшается. Требования, предъявляемые к техническим средствам, используемым в гибком производстве и комплексных системах, часто не выполняются. При этом на практике довольно сложно путем итерации соответствующих методов разработать комплексную систему, которая могла бы применяться для обработки широкой номенклатуры изделий. Методика проектирования, проведения анализа и оценки в настоящее время дорабатывается.

В качестве альтернативы предыдущим методам, которые имеют три этапа «проектирование --- анализ --- реализация», существуют методы, которые содержат больше, например пять, этапов --- «проектирование изделий --- прогноз --- анализ --- реализация (принятие решения) --- подробный проект».

При анализе и обработке используются данные, полученные после выяснения побуждающих мотивов и целесообразности использования деталей в системе. Затем проводится подробная разработка проекта системы. Прогноз позволяет получить более ясное и точное представление, является ли подход к разработке комплексной системы реальным и достаточно взвешенным. Достоинством данного метода являются меньшие затраты времени на доработку одного варианта, а также то, что он позволяет отдать предпочтение более прогрессивному решению. Более точное прогнозирование скелета идеальной конфигурации системы нерархически вытекает из соответствующей рабочей модели.

При определении строения рабочих моделей производственных систем могут применяться методы имитации. Имитацию можно применять при моделировании многих деталей. В остальных случаях разрабатываются специальные пакеты программ. Такие пакеты заменяют программирование со стороны пользователя. Пользователь стремится к получению входных данных, а имитационные пакеты автоматически генерируют имитационные модели. В настоящее время существует целый ряд таких пакетов. Внимания заслуживает прежде всего SIMAN

(Simulation Analysis). Программа SIMAN предназначена для моделирования комбинированных дискретно-непрерывных систем. При изучении характеристик пакетов программ для проектирования производственных систем выявляются требования к гибкости структуры банка данных. Создание такой базы стоит дорого.

Обобщение мирового опыта разработки интегрированных производств с управлением от ЭВМ свидетельствует о том, что при разработке заводов будущего необходимо соблюдать следующие правила:

1. Проводить планирование посредством системы сверху вниз, создавать посредством системы снизу вверх.

2. Не создавать комплексную автоматизацию «на зеленом лугу». Действовать с учетом существующего состояния (прежде всего параметрического уровня компонентов) промышленным способом.

3. Провести анализ и синтез материальных и информационных потоков заранее до окончательного определения оборудования.

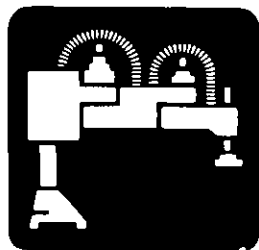
4. Разработать и реализовать программу по исключению информационных потоков, реализованных в форме бумажной документации, и заменить электронной информационной техникой.

5. Не забывать о приоритетном положении изделий. Понимать, что путь к полной автоматизации проходит через новые или расширенные объемы изделий, а не через реализацию производства старых изделий путем применения новой техники.

6. Подготавливать кадры, развивать тенденцию к объединению организаций на базе надежных партнеров.

В настоящее время уже очевидно созрела ситуация, когда могут начаться работы по созданию заводов будущего, которые будут иметь высокую степень автоматизации и интеграции. Центр тяжести таких работ будет необходимо переместить в область антиципации проектных работ и создания образцовых экспериментальных цехов (ячеек, ГПС и т. п.). Для перспективных целей компьютерного интегрированного производства (CIM) требуется создавать базу знаний, развивать системологию сложных систем и методологию проектирования.

Средства автоматизации процессов машиностроения



Глава 9

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

§ 9.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

В промышленности в последние десятилетия исключительно бурное развитие получили промышленные манипуляторы и роботы — высокоэффективные средства автоматизации основных и вспомогательных дискретных процессов во всех отраслях промышленного производства.

Промышленные манипуляторы успешно применяются при автоматизации дискретного производства, где нет необходимости переналадки производственных машин и оборудования. Такие манипуляционные устройства, как автооператоры, механические руки и т. п. оборудование, давно уже являются частью автоматических линий различного технологического назначения, а также автоматов и полуавтоматов, где они подают детали в рабочие зоны, убирают их оттуда, ориентируют их в пространстве и транспортируют. Многолетнее применение промышленных манипуляторов в массовом и крупносерийном производстве с дискретными процессами позволило накопить опыт их конструирования, рациональной разработки и определить наиболее подходящие области их применения, а также условия эффективной эксплуатации и текущего ремонта.

Постоянно развиваются и совершенствуются конструкции промышленных манипуляторов и их управления, конструкции захватывающих и прочих устройств, расширяется диапазон осуществляемых операций, растет сфера применения манипуляторов.

Больших успехов в конструировании и производстве промышленных манипуляторов добилась Болгария. Два типа промышленных манипуляторов — «портальные» и «стоячие» семейства «Гирин» для

автоматической загрузки самостоятельно действующих автоматических металлорежущих станков или встроенные в автоматические линии были сконструированы в ЦНИИММ (София) и производятся в городе Стара Загора. Семейство «Пирин» включает в себя манипуляторы, конвейеры и прочие устройства, необходимые для создания технологических модулей. О больших успехах болгарского машиностроения и болгарских специалистов свидетельствует применение болгарских промышленных манипуляторов в СССР (свыше 400 «портальных» манипуляторов включены в автоматические линии второй очереди КамАЗа и других предприятий). В Германии «стоящие» манипуляторы включаются в системы РОТА.

В будущем применение промышленных манипуляторов будет непрерывно расширяться, будут создаваться новые их конструкции и типы, что позволит использовать их всюду, где производство имеет дискретный характер, вне зависимости от типов и размеров обрабатываемых и монтируемых деталей и изделий.

К числу важных задач относится также расширение номенклатуры промышленных манипуляторов, улучшение их функциональных характеристик, многократное увеличение их производительности, безотказность работы, обеспечение высокого качества производимой продукции, доступные цены и все то, что необходимо для эффективного обслуживания промышленных манипуляторов, действующих в промышленном производстве.

Промышленные роботы — это сложные, автоматически действующие программируемые машины, осуществляющие действия, аналогичные выполняемым человеком и используемые для автоматизации транспортных или технологических операций. Образцом для тех, кто создавал концепции промышленных роботов и осуществлял их, служил человек, выполняющий физическую работу. Характерная особенность промышленного робота — его активное и целенаправленное информационное и физическое взаимодействие с окружающей средой. Обязательной составной частью робота является исполнительный орган, служащий для взаимодействия с внешней средой. Промышленные роботы создаются для удовлетворения требований технологической гибкости технических средств, автоматизации серийного и мелкосерийного производства, а в последнее время и мобильного массового производства. Обязательная черта робота — его многофункциональность, возможность быстрой переналадки при манипулировании, обработке или сборке разнообразных изделий. К числу обязательных признаков робота относится и его автоматизм, т. е. способность функционировать автономно, без непосредственного участия человека.

Промышленные роботы характеризуются большой надежностью, быстрой работой, высокими скоростями и ускорениями подвижных органов, точностью позиционирования, исключительной сложностью систем управления. Автоматические машины этого нового вида подразделяются на группы в зависимости от степени универсальности и функционального назначения.

К числу характеристик любого робота относится число исполнительных органов (механические руки, манипуляторы), число степеней подвижности отдельных рук, тип рабочей зоны (вид и объем), грузоподъемность, вид привода, точность позиционирования, вид и объем системы управления, способ обучения и др.

Роботы имеют одну или две (иногда до четырех) степени свободы (подвижности). Число степеней подвижности определяется разнообразием движений рук и робота как целого: у отдельных рук таких движений бывает от 3 до 10, у самого робота - от 1 до 3.

Привод робота может быть электрическим, гидравлическим, пневматическим и комбинированным. Его выбор определяется грузоподъемностью (масса объекта манипуляции и рабочих органов), точностью позиционирования и динамическими характеристиками робота, функциональным его назначением. Основными характеристиками управления роботами служат: принципы управления в движении, характер участия в управлении человека-оператора, число управляемых роботов или рук (манипуляторов) отдельных роботов, одновременное управление производственным механизмом, промышленным роботом и включенными в технологический модуль устройствами автоматизации, способ аппаратно-программного обеспечения управляющего устройства и т. д.

Системы управления подразделяются в зависимости от лежащих в их основе принципов на системы с программным управлением, системы управления, действующие по принципу функции от состояния внешней среды, и комбинированные системы.

Промышленные роботы первого поколения являются автоматическими манипуляторами с программным управлением с «жесткой» программой ряда действий, однопрограммными с трудом поддающимися перепрограммированию роботами, где целевая программа вводится в память системы. Это происходит посредством обучения, в ходе которого рабочий орган робота передвигается обслуживающим его работником при осуществлении необходимого целевого движения, или путем прямой кодированной записи информации, касающейся соответствующих движений. Кроме роботов первого поколения в промышленности находят уже применение и роботы второго поколения, работающие по гибкой программе, снабженные чувствительными устройствами для восприятия информации от внешней среды и управления с помощью ЭВМ.

Большая часть современных задач автоматизированного производства может быть решена с помощью роботов третьего поколения — «интегральных» или «интеллектуальных» роботов. Они будут способны полностью адаптироваться к условиям работы и производства.

Промышленные роботы подразделяются не только по принципу принадлежности к тому или иному поколению. В настоящее время имеется несколько подробных классификаций роботов. В СССР уже разработана стандартная классификация промышленных роботов, в будущем она, возможно будет принята и другими странами. Эта клас-

Таблица 9.1. Классификация

Классификационные группы	Общие			
	Подвижность	Грузоподъемность	Число манипуляторов	Координатная система
А	Неподвижные	Очень малая (до 1 кг)	1	Прямоугольная
Б	Подвижные стоячие	Малая (1—10 кг)	2	Цилиндрическая
В	Подвижные висячие	Средняя (10—100 кг)	Многоманипуляторные	Сферическая
Г	—	Высокая (свыше 100 кг)	—	Комбинированная

Таблица 9.2. Классификация

Подвижность			Управление
Степень подвижности	Ход манипулятора, мм	Скорость, м/с	Тип управления
Малая (до 3 степеней)	Малый (до 300)	Малая (линейная скорость до 0,5)	Цикловой программный
Средняя (4—6)	Средний (300—1000)	Средняя (0,5—1)	Позиционно-программный
Большая (6 и больше)	Большой (свыше 1000)	Большая (свыше 1)	Контурно-программный

сификация отражает различия в конструктивном выполнении, специализацию, грузоподъемность и другие технические и эксплуатационные характеристики. Классификации (табл. 9.1, 9.2) целесообразно придерживаться для систематизации данных, определяющих технологические возможности и область применения промышленных роботов с учетом их использования при создании автоматических технологических модулей и автоматических комплексов. Необходимость применения промышленных роботов связана с необходимостью обеспечения высокой интенсивности производства при автоматизации производственных процессов и операций дискретного характера в различных отраслях промышленности. В настоящее время промышленные роботы чаще всего используются для сварки (свыше 60%), окрашивания, переноса тяжелых изделий в кузнечно-прессовых и механических цехах и т. п.

промышленных роботов

выполнение

Тип привода	Выполнение	Погрешность позиционирования	Степень универсальности
Пневматический	Обычное	Малая точность (свыше 1 мм)	Специальные
Гидравлический	Защита от пыли	Средняя (0,1—1 мм)	Специализированные
Электромеханический	Защита от высоких температур	Высокая (менее 0,1 мм)	Универсальные
Комбинированный	Пожаро- и взрывобезопасное	—	—

промышленных роботов

Управление

Метод программирования	Объем памяти	Число команд
Посредством обучения (ручного, полуавтоматического, автоматического)	Малый (менее 100 кадров)	Малое (до 15)
Аналитический (механизированное и автоматическое составление программ)	Средний (100—600 кадров)	Среднее (15—60)
Посредством самообучения; с участием оператора; в процессе работы	Большой (свыше 600 кадров)	Большое (свыше 60)

Особенно перспективно применение промышленных роботов в тех отраслях производства, где очень высока производительность и требуется исключительная точность при обработке деталей или монтаже изделий, когда выполнение всех операций человеком невозможно, а также при осуществлении операций, требующих тяжелого физического труда, вредных, опасных и монотонных операций, операций и процессов, осуществление которых лишено творческого характера. В этих случаях применение промышленных роботов ведет к гуманизации производства и повышению производительности труда.

Применение промышленных роботов требует коренных изменений в существующих технологических процессах, инструментах, оборудовании, организации производства. Новые требования предъявляются к самим производственным механизмам в аспекте их пригодности к совместной работе с промышленными роботами. Для успешной работы

роботов, включенных в технологические модули и автоматические комплексы, необходимы многочисленные и разнообразные средства автоматизации. Вот почему применение промышленных роботов ни в коем случае нельзя рассматривать как изолированную деятельность, это лишь часть совокупной деятельности, направленной на автоматизацию производства, имеющего дискретный характер.

Во всем мире существует тенденция к созданию роботов по модульному принципу, высокой степени унификации, относительно простых по конструкции, менее дорогих, чем сейчас, надежных в эксплуатации. Постоянно уменьшается производство универсальных роботов и расширяется производство специализированных технологических модулей (станок — робот — средства автоматизации). Таковы специализированные разработки по автоматизации конкретных процессов и операций — сварки, окраски, кузнечных операций, литейных процессов и механической обработки, сборки и т. д. Особенно успешно в последние годы разрабатывались транспортные роботы, так называемые робокары. Они позволяют комплексно решать вопросы автоматизации внутрицехового и внутризаводского транспорта.

Особенно перспективным направлением представляется автоматизация с помощью промышленных манипуляторов и роботов сборочных операций. Весьма серьезной и не решенной до конца проблемой в развитии промышленных роботов является создание необходимых тактильных и визуальных чувствительных устройств. Нехватка таких устройств служит главным препятствием на пути к широкому использованию промышленных роботов в сборочных операциях.

Особого внимания и постоянного развития в различных областях и основных направлениях высокоэффективной автоматизации производства с дискретными процессами, где используются промышленные манипуляторы и роботы, заслуживают подготовительные процессы и операции механической обработки и сборки, осуществляемые в ходе производства и сборки мелких изделий. Такого рода деятельность преобладает во всех отраслях с дискретным характером производства — мелкие изделия составляют свыше 90% всей продукции электротехнической, электронной, фармацевтической, парфюмерной и других отраслей промышленности. Даже в автомобильной промышленности свыше 85% всех изделий имеют массу до 5 кг. Это обстоятельство объясняет всевозрастающий интерес к высокопроизводительным техническим средствам автоматизации дискретного производства деталей и изделий небольшой величины и массы — к малым манипуляторам и роботам, малым автоматам, полуавтоматам и механизмам с ЧПУ, средствам автоматизации, автоматическим линиям и гибким системам машин для комплексного обеспечения технологических и производственных процессов.

Разработанный в 1972 г. на кафедре автоматизации дискретного производства Высшего машиноэлектротехнического института (София) первый болгарский робот с цикловым управлением АДП-1, ряд других конструктивных разработок устройств автоматизации и автоматов для

производства мелких изделий, а также проведенные позже (1976—1985 гг.) на болгарских предприятиях по специально разработанной кафедрой методики программе исследования потребности страны на промышленные роботы (95 предприятий) и технические средства автоматизации монтажных процессов и операций (42 предприятия), а затем и исследования применения ручного труда на предприятиях машиностроения и электроники послужили научной основой целенаправленной и высокоэффективной деятельности по автоматизации процессов и операций при производстве мелких изделий с использованием промышленных роботов.

Исключительно высокие требования предъявляются к надежности промышленных роботов. В результате больших успехов, достигнутых в мировой практике, отказы не превышают 1—3% времени работы промышленных роботов, продолжающейся 800—1000 ч. В результате еще более возрастают требования, предъявляемые к их изготовителям в отношении точности, к качеству используемых при их производстве материалов и обслуживанию. Важное значение имеют также оперативность и квалификация обслуживающего персонала. Без совершенной организации и высококвалифицированных специалистов эффект применения промышленных роботов и вообще всех высокопроизводительных средств автоматизации свелся бы к нулю.

В Японии создан и уже находится в промышленной эксплуатации автоматический завод по производству механизмов с ЧПУ и промышленных роботов. В этом типично серийном производстве автоматизированы все основные и вспомогательные операции. Степень автоматизации составляет 96%. Автоматические комплексы и автоматические механизмы не только производят разнообразные изделия машиностроения, но и автоматически монтируют, контролируют и испытывают готовую продукцию — механизмы с ЧПУ. Сложная автоматическая производственная техника обслуживается минимальным числом работников, занятых преимущественно в первую смену. В ночную (третью) смену автоматические комплексы, включающие в себя значительное количество промышленных роботов и средств автоматизации, работают без обслуживания, по автоматическому циклу, лишь два имеющихся на заводе оператора наблюдают за ними с помощью мониторов. Непосредственное управление станками с ЧПУ, системами станков промышленных роботов осуществляется электронно-вычислительными машинами, как и управление автоматическим производством в целом. В Японии работают уже и несколько автоматизированных заводов. На предприятии «Ниссан моторс», например, на линии сборки корпусов занято только 70 человек, а сварку выполняют 124 робота. В фирме «Окума» уже более 10 лет работает первый гибкий производственный комплекс, состоящий из семи машинных клеток и одного робота. Обслуживают комплекс три человека. На высоком уровне находятся и совсем недавно введенные в действие заводы-автоматы фирм «Ямасаки» и «Тошиба».

Т а б л и ц а 9.3. Промышленные роботы для транспортных

Обозначение	Число модификаций	Привод	Основные	
			Грузоподъемность	Число степеней свободы
РБ 110	2	Пневматический	25	5
РБ 112	3	»	20	5
РБ 231	27	Гидравлический	30	6 7
РБ 232	27	»	135	6 7
РБ 233	27	»	180	6 7
РБ 234	27	»	544	6 7
РБ 241	3	Электромеханический	20	5
РБ 242	1	»	10	5

* Расшифровка сокращения в тексте оригинала не производится. (примечание перевод-

Т а б л и ц а 9.4. Основные технические параметры

Обозначение	Количество модификаций	Назначение	Привод	Система координат
РБ211	2	Нанесение покрытия	Гидравлический	Антропоморфный
РБ251	7	Сварка стали и алюминиевых сплавов	Электромеханический	Декартова
РБ255	2	Лазерное резание и сваривание	То же	То же

* Расшифровка сокращения в тексте оригинала не приводится (примечание перевод-

Аналогичный по степени автоматизации производственный участок функционирует в Болгарии и на предприятии «Берое» в городе Стара Загора.

Большое распространение в последнее время получили промышленные роботы и гибкие автоматические производственные комплексы не только в Японии и США, но и в Западной Европе. В основном это роботы первого поколения, снабженные тактильными и визуальными чувствительными устройствами. Около 40% роботов приходится на автомобильную промышленность, но сфера их применения расширяется, захватывая в первую очередь электронику, электротехнику и производство вычислительной техники. Быстро увеличивается число роботов, используемых в исследованиях, экспериментах и обучении.

и погрузочно-разгрузочных операций

технические параметры

горизонтальная, м/с	Скорость		Погрешность позиционирования, мм	Управление	Объем памяти (шагов)
	вертикальная, м/с	вращения, об/с			
1	0,25	90	$\pm 0,5$	Цикловое	256
1	0,30	90	$\pm 0,5$	»	256
0,91	0,91	90	$\pm 1,5$	РТР*	1000
0,91	0,91	90	$\pm 2,7$	РТР	1000
0,76	0,91	90	$\pm 2,7$	РТР	1000
0,76	0,91	90	$\pm 2,7$	РТР	1000
1	0,5	60	± 1	РТР	300
0,5	0,5	120	$\pm 0,5$	РТР	300

чика).

промышленных роботов для технологических операций

Грузоподъемность, кг	Число степеней свободы	Скорость, м/с	Погрешность позиционирования, мм	Управление	Объем памяти
15	6	2	5	СР*	900 с
5	9	10	$\pm 0,5$	СР	3000 шагов
10	До 4	8	$\pm 0,1/1000$	РТП*	10 м магнитной пленки

чика).

Если в начале 1986 г. их было 200, то в настоящее время уже более 337.

В табл. 9.3 и 9.4 приведены некоторые данные, характеризующие производимые в НРБ транспортно-манипуляционные и технологические промышленные роботы.

§ 9.2. МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП КОНСТРУИРОВАНИЯ

При создании промышленных роботов особое значение имеет подход, осуществляемый при их конструировании. Концепция конструирования промышленных роботов с течением времени и по мере накопления опыта непрестанно менялась. Первые конструкции промышленных

роботов представляли собой универсальные устройства, способные заменять человека при выполнении самых разнообразных технологических операций, начиная с подачи материалов для различного технологического оборудования и кончая выполнением таких основных технологических операций, как монтаж, окраска, сварка. Это были роботы с многокоординатной кинематической структурой, с позиционными и контурными системами управления.

В соответствии с классификацией, подразделяющей оборудование на универсальное, специальное и специализированное, развивались и соответствующие направления в конструировании промышленных роботов. Практика показала, однако, несостоятельность концепции создания универсальных промышленных роботов для автоматизации разнотипных и разнообразных технологических операций с помощью нескольких конструкций. Нерациональной оказалась и противоположная концепция, делавшая акцент на узкой специализации промышленных роботов на выполнении конкретных технологических операций и видов деятельности в данном производстве. В этом случае область применения роботов и серийность их производства оказывались весьма ограниченными.

При наличии большого числа разнотипного технологического оборудования, подлежащего автоматизации, необходимы гибкие конструкции и в первую очередь гибкая механическая часть, в результате чего постепенно осуществляется переход к агрегатно-модульному принципу конструирования, к созданию агрегатно-модульных конструкций.

Концепция создания простых промышленных роботов, число координат которых определяется конкретной технологической операцией, выражает стремление к специализации промышленных роботов. Разработка завершённых в функциональном отношении узлов модулей, из которых могут быть скомпонованы различные структуры промышленных роботов в зависимости от требований, предъявляемых данной технологической задачей, выражает стремление к созданию простых промышленных роботов путем отказа от той части конструкции, в которой нет необходимости при обслуживании существующего технологического оборудования различных размеров и расположения рабочей зоны. В этом случае агрегатно-модульный принцип конструирования способствует сокращению времени и трудоемкости проектирования промышленных роботов за счет повышения уровня унификации и типизации механизмов, удешевление производства путем уменьшения номенклатуры деталей и узлов. Кроме того, в робототехнике имеется определенный класс задач, для решения которых целесообразно расположение рядом однотипных модулей, реализующих различные виды движения, что дает возможность компоновать многообразные конструктивные схемы. К этим задачам можно отнести повышение уровня механизации и автоматизации оборудования, входящего в автоматизированные комплексы с роботами, и создание ряда вспомогательных устройств для этих комплексов.

Следует отметить также целесообразность использования агрегатно-модульного принципа при создании систем для локального и группового управления технологическим оборудованием и промышленными роботами. В общем можно говорить об агрегатно-модульном принципе конструирования, имея в виду, что из ограниченного числа модулей komponуется любая структура промышленных роботов. Дальнейшее развитие принципа связано с унификацией конструктивных элементов на уровне не только узлов, но и деталей. Базовые модули промышленных роботов служат основой создания гамм промышленных роботов типовых размеров и унифицированных в конструктивном отношении при соблюдении большой конструктивной преемственности и схожих по конструктивному выполнению. Агрегатно-модульный принцип конструирования может оказаться несовместимым с требованиями, предъявляемыми отдельными технологическими процессами.

В принципе для каждой технологической группы роботов необходимо разработать ряд типовых модулей. Это один из важных, но частный принцип конструирования промышленных роботов. При создании агрегатно-модульных манипуляционных систем (АММС) мы имеем дело с тремя основными типами, подразделяющимися на две группы: простые АММС, смешанные АММС. АММС первой группы бывают закрытыми и открытыми. Закрытые характеризуются ограниченным числом составных элементов, что уменьшает число возможных вариантов. Отдельные модули полностью совместимы друг с другом. Открытые АММС, наоборот, состоят из большого числа составных элементов, что создает большие возможности для комбинирования. Развитие открытых систем посредством применения дополнительных элементов ведет к созданию комбинированных систем.

Закрытые системы находят применение при решении весьма узких задач. Малое число элементов позволяет, с одной стороны, ограничить расходы на решение задачи, но, с другой стороны, требует высокой степени конкретизации и высокого технического уровня составных элементов, способного обеспечить их совместимость.

Большое число различных рабочих мест и многообразие периферийных устройств требуют от АММС большой гибкости, в силу чего производители отдают предпочтение открытой системе. В противоположность закрытой системе здесь можно добиться большой гибкости, проявляющейся в решении самых разнообразных манипуляционных задач в ходе различных процессов. Кроме того, имеются возможности расширения системы в случае появления новых областей применения за счет использования и сохранения уже установленных элементов. При таком подходе расходы малы, так как отдельные элементы создают более продолжительное время и есть возможность использовать уже осуществленные разработки и применять имеющиеся составные элементы. Открытая система сменяется комбинированной, при этом имеется возможность создания элементов, которые точно соответствуют требованиям потребителя.

Вне зависимости от вида системы, в каждом случае необходимо бывает исходя из области применения и задач, которые необходимо решить, определить отдельные элементы, из которых система создается.

Создание промышленных роботов с гибкой модульной структурой, соответствующей конкретным условиям производства, обеспечивает максимальное использование функциональных возможностей, малые сроки окупаемости и высокий экономический эффект. Благодаря проводимым в производственных условиях испытаниям модульных конструкций происходит ускоренное их внедрение. Создаются возможности организации типовых рабочих мест, унификации и типизации рабочих единиц при комплектовании АТМ и АТЛ (технологических модулей и линий).

Агрегатно-модульный принцип требует как компоновки промышленных роботов из отдельных модульных единиц, так и создания последних из отдельных модульных звеньев и элементов.

Из всего сказанного становится понятным, что наиболее целесообразно в экономическом отношении конструировать АММС. Вполне логично, что промышленные роботы, созданные из модулей, предназначенных для данной конкретной конструкции, должны перерастать в АММС для организации универсальных систем, т. е. необходимо иметь единую АММС для данного типа производства, отрасли и т. д. Это вполне соответствует тенденции к увеличению абсолютного числа роботов при уменьшении чрезмерного многообразия моделей с постоянной структурой.

Производство АММС для создания промышленных роботов представляет новый подход, ведущее направление в роботостроении. Они являются основой комплексно автоматизированного производства с дискретными процессами. Сфера применения агрегатно-модульного принципа будет расширяться, он используется и при конструктивном оформлении самих модулей типовых звеньев и элементов: направляющих, ведущих втулок, фланцев, элементов привода, демпферов и т. д.

В АММС эксплуатационные показатели могут варьироваться и улучшаться благодаря компоновке модулей, имеющих одинаковое назначение, но различное конструктивное выполнение, чтобы соответствовать необходимому минимуму функциональных требований. С помощью удачной подборки отдельных модулей и возможных способов их компоновки конструкции можно придать оптимальные динамические качества. Грузоподъемность, стабильность конструкции и функциональная пригодность могут быть оптимизированы как путем подбора отдельных модульных единиц, так и путем использования элементов различных типоразмеров.

Компоновка промышленных роботов из модульных единиц позволяет рационально выбрать систему координат, в которой будет работать промышленный робот, чтобы она соответствовала рабочему пространству остального оборудования и периферийным устройствам автоматизированного рабочего места, АТМ или ПАЛ. Наиболее серьезным

аргументом в пользу необходимости создания АММС служит возможность компоновки промышленных роботов из модульных единиц, в которых оптимальная грузоподъемность достигается как путем подбора различных модулей, так и за счет модулей одинакового назначения с различными функциональными особенностями и различного конструктивного выполнения.

§ 9.3. ПРИВОДЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Посредством привода энергия на входе механизма превращается в механическое движение, которое с помощью соответствующего механизма превращается в движение рабочего органа промышленного робота. При этом предъявляются определенные требования к скорости движения и точности позиционирования рабочего органа робота. Скорость движения зависит от конкретного назначения промышленного робота. При автоматизации транспортно-загрузочных операций, например, при обслуживании данного производственного оборудования или линии требуется высокая скорость, чтобы вспомогательное время было минимальным. Максимальная скорость промышленных роботов составляет 10 м/с. Начало и конец движения должны быть плавными, чтобы уменьшить колебания крайнего звена при позиционировании. При выполнении технологических операций, однако, основное требование заключается в обеспечении равномерности осуществляемого с определенной скоростью движения.

Точность позиционирования зависит от вида привода и управления им, а также от точности считки действительного положения рабочего органа промышленного робота. Преобладают открытые системы управления приводами промышленных роботов, но в силу постоянно увеличивающегося применения промышленных роботов, ведущего к повышению требований в отношении точности позиционирования, особенно при осуществлении требующих большой точности монтажных операций, будет все более возрастать применение закрытых систем, где сигнал управления получают с использованием обратной связи от положения.

В зависимости от способа осуществления привод может быть:

а) внешним, при котором используется связь с другим оборудованием, чаще всего с производственным механизмом, вместе с которым работает промышленный робот; б) внутренним — связь со своим двигателем.

В зависимости от структуры привод может быть: а) общим, когда отдельные движения обеспечиваются одним двигателем одновременно, последовательно или комбинированно; б) отдельным, когда каждая единица, осуществляющая данное движение, имеет отдельный привод; в) комбинированным.

Общий и внешний привод характерны для промышленных роботов с жестким управлением и простой конструкцией. Современные конст-

рукции промышленных роботов, созданные на базе агрегатно-модульных манипуляционных систем, имеют отдельный привод.

В зависимости от вида используемой энергии различают электроприводы, гидроприводы, пневмоприводы, комбинированные приводы.

Часть электропривода представляет собой электрическую цепь, посредством которой привод связан с системой управления релейно-контактной, электронной и т. д. В случае пневмопривода используется пневматическая или электрическая (электронная) система управления. Гидропривод чаще всего сочетается с электрической (электронной) системой управления.

Управление промышленными роботами. В настоящее время созданы и функционируют многочисленные и разнообразные устройства для управления промышленными роботами. Следует подчеркнуть, что несмотря на некоторые специфические особенности систем управления промышленными роботами, основные требования, предъявляемые при их создании, разработке и эксплуатации, те же, как и в случае систем управления автоматическими производственными машинами, линиями и комплексами. Создание ряда систем управления промышленными роботами и сегодня основывается на опыте создания систем для цифрового программного управления механизмами станков.

Коротко остановимся на некоторых особенностях систем управления, называемых цикловыми, позиционными и контурными.

Цикловые системы управления находят применение в самых простых промышленных роботах типа «возьми — поставь». Осуществляется определенная последовательность перемещения манипулятора для выполнения заданной производственно-технической задачи. Рабочий цикл разбивается на такты, поскольку последовательность движений может программироваться. Для программирования применяются штепсельные панели, программные вращающиеся барабаны, устройства на перфолентах или перфокартах. Особенно перспективны программируемые контроллеры с относительно небольшим числом входов — выходов, имеющие большую надежность, легко перенастраиваемые и обладающие рядом других достоинств, обусловленных их модульным характером.

Позиционные системы управления предназначены в основном для манипуляционных промышленных роботов и соответствующих технологических устройств.

Контурные системы управления предназначены для технологических роботов.

В последние годы особенно прогрессивным признается групповое управление промышленными роботами с помощью ЭВМ. Основой создания систем управления такого типа служит опыт создания группового управления станками с ЧПУ. В принципе системы группового управления могут применяться и при цикловом, и при позиционном, и при контурном управлении промышленными роботами. Они применяются и для управления рядом вспомогательных операций — транспортировкой заготовок, приспособлений, инструментов и готовых де-

талей, промежуточным хранением и складированием. Задачи могут решаться на двух уровнях: на низком — обеспечение осуществления технологического процесса и высоком — повышение эффективности работы системы как целого.

Основные задачи низкого уровня: координатное управление работой манипулятора робота, а также управление динамикой манипулятора, рабочим органом робота, конвейером и дополнительными устройствами.

К задачам управления на высоком уровне относятся: обучение, контроль качества выполняемой работы, распределение потребляемой энергии во времени с целью минимизации энергетических расходов, оперативный контроль за состоянием устройств автоматического комплекса, адаптация.

Основными частями системы группового управления являются аппаратная часть и программная часть. К первой относятся: модули для управления отдельными элементами, промышленные роботы и комплексы; модули для программного управления технологическим процессом, модули для обучения. Программное обеспечение включает следующие программы: обучение, управление координатами и технологическим процессом, организация диалога с оператором, диагностика, распределение энергии.

§ 9.4. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАБОЧИХ МЕСТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Организация автоматизированных рабочих мест (АРМ) с применением промышленных роботов (ПР) позволяет и в гибком производстве повысить эффективность производственного оборудования, облегчить и сделать более интересным труд людей и уменьшить риск несчастных случаев. Устройство АРМ сопровождается, однако, преодолением ряда трудностей, возникающих при сочетании роботов с производственным оборудованием, транспортно-загрузочными механизмами, устройствами управления, при организации их обслуживания и текущего ремонта, обеспечении экономической эффективности внедрения и т. д.

Учитывая перечисленные положительные моменты и трудности, связанные с внедрением АРМ с применением ПР, можно указать следующие основные принципы их организации.

1. Необходимо правильно выбирать объекты автоматизации с использованием ПР. Выбор должен явиться результатом изучения всего производства и разработки общей концепции его усовершенствования.

2. Необходимо обеспечить технические, экономические и организационные предпосылки производства и внедрения АРМ с ПР.

3. Необходимо пользоваться основывающейся на научных данных методикой выбора оптимального варианта АРМ с ПР.

Остановимся на задачах, вытекающих из первого и второго принципов, а выбор оптимального варианта АРМ с ПР будет рассмотрен в § 9.5.

Выбор рабочих мест, подлежащих автоматизации с применением ПР, осуществляется в несколько этапов [5]. Сначала на национальном уровне выбирают приоритетные отрасли. Это делается путем сравнения с состоянием автоматизации в соответствующих отраслях наиболее передовых в этом отношении стран, путем анализа необходимости уменьшения ручного труда, устранения вредного труда и ликвидации нехватки рабочей силы. На втором этапе выбирают конкретные объекты (предприятия) приоритетных отраслей, позволяющие получать самый высокий эффект, с учетом имеющихся ресурсов финансирования деятельности по автоматизации.

Рассмотрим подробнее этапы, связанные с выбором рабочих мест для автоматизации с применением ПР на конкретном предприятии. С этой целью анализируется производственный процесс на предприятии, для чего изучаются рабочие места. Сразу же исключают из дальнейшего рассмотрения рабочие места, явно не подходящие для автоматизации, руководствуясь при этом следующими соображениями: область, в которой применение ПР наиболее целесообразно, характеризуется средними и высокими скоростями хода производственных процессов, средней и малой продолжительностью производственных операций в условиях гибкого производства.

Для более тщательного изучения выбираются рабочие места, удовлетворяющие трем следующим основным требованиям:

- деятельность, осуществляемая на данном рабочем месте, включает операции манипулирования (ориентирование в пространстве, транспортировка, обрубка, захват, внесение в рабочую зону, точное позиционирование, затяжка и т. п.);

- выполняются многократно повторяющиеся рабочие ходы; рабочие ходы всегда однозначно определены.

Более подробное обследование рабочих мест, на которых возможна автоматизация, включает в себя исследование: а) технической сложности осуществления автоматизации с ПР; б) экономического эффекта от осуществления автоматизации с ПР; в) социального эффекта автоматизации с ПР.

Техническая целесообразность создания АРМ с ПР тем больше, чем больше число положительных ответов на следующие вопросы:

Является ли автоматическим привод основного движения? вспомогательного движения?

Автоматически ли осуществляется управление изменением пути? скоростями ходов? последовательностью операций? зажимом и разжимом обрабатываемых (монтируемых) деталей?

Автоматически ли осуществляется подача инструмента? подача деталей? непрерывный контроль рабочих условий (если необходимо)? непрерывный контроль за обрабатывающим инструментом (если не-

обходимо)? подача вспомогательного материала в каждом цикле? устранение отходов в каждом цикле?

Если для всех обследованных рабочих мест число положительных ответов T превышает 70 %, то организация АРМ с ПР может оказаться целесообразной. При $T = 25 \dots 70$ % она целесообразна лишь при определенных условиях, а при $T < 25$ % обычно считается нецелесообразной.

Экономический эффект организации АРС с ПР тем больше, чем больше коэффициент сменности рабочего места, число освобождающихся работников, продолжительность (срок) эксплуатации рабочего места после его автоматизации.

Чистая перенастройка рабочих мест и обширная номенклатура обрабатываемых деталей удорожают автоматизацию и уменьшают экономический эффект. Ориентировочно экономическую целесообразность создания АРМ с ПР (обозначим это Э) можно определить, подсчитывая процент положительных ответов на следующие вопросы:

превышает ли число рабочих смен ежедневно 1?

превышает ли число работников в одной смене 1?

меньше ли частота перенастройки за смену 2?

меньше ли число различных по форме деталей, обрабатываемых за один год, 20?

больше ли срок эксплуатации АРМ с ПР 2 лет?

При $\mathcal{E} \geq 60$ % создание АРМ с ПР представляется целесообразным.

При $20 \% < \mathcal{E} < 60$ % целесообразность ограничена. При $\mathcal{E} \leq 20$ % автоматизация с экономической точки зрения представляется не имеющей смысла.

Социальный эффект создания АРМ с ПР тем выше, чем больше людей освобождено будет от выполнения тяжелого, вредного для здоровья и опасного труда. С санитарно-гигиенической и эргономической точек зрения могут быть предложены следующие основные критерии оценки условий труда: нагрузка на создание и нервы (в зависимости от нагрузки на органы чувств человека и ответственности, лежащей на нем в связи с наблюдением за процессом), монотонность (в зависимости от частоты изменений хода процесса и необходимости принимать самостоятельные решения), нагрузка на мышечную систему (в зависимости от величины, продолжительности и распределения в ходе рабочей смены физической нагрузки) и шумовая нагрузка — в зависимости от силы звука (его давления) и вида звука (его частоты), а также распределения во времени.

В соответствии с указанными критериями можно привести следующие примеры высокого уровня нагрузки: постоянное выполнение контрольных операций с очень маленькими или требующими при изготовлении высокой точности деталями; работа на поточном конвейере при массовом производстве, работа в положении стоя с постоянным манипулированием деталями массой свыше 10 кг, шум в кузнечном цеху.

Примерами среднего уровня нагрузки в соответствии с приведенными критериями могут служить осуществление точных и нешаблон-

ных действий; работа в условиях крупносерийного производства с эпизодическими изменениями программы, работа в положении стоя с частыми наклонами и подниманием деталей массой до 10 кг; шум пресов при обработке листового материала.

Умеренными нагрузками считаются наблюдение за процессами средней сложности, например за работой станков с ЧПУ, работа в условиях мелко- или среднесерийного производства при изготовлении деталей средней сложности с частой сменой производственных программ, например работа оператора на станках с ЧПУ; работа в положении стоя с легкими деталями; шум от металлорежущих станков при отсутствии предельных шумов.

Примерами малых нагрузок в соответствии с приведенными критериями могут служить наблюдение за простыми процессами, единичное производство больших деталей или узлов, сидячая работа с манипулированием легкими предметами, слабый шум машин (например, в испытательном помещении).

Значение различных видов нагрузки для принятия решения относительно необходимости создания АРМ с ПР в силу социальных причин неодинаково. Оно может быть подсчитано с использованием, например, следующих весовых коэффициентов K :

K_1 1 — работа в защитной одежде или при вибрации;

K_2 2 — при опасности простуды, при повышенной влажности, в присутствии кислот или щелочей, газов или паров, при плохом освещении или слепящем свете;

K_3 3 — при мышечной нагрузке, в грязной или пыльной рабочей среде или при высокой температуре;

K 4 — в условиях монотонности и шума;

K 5 — при опасности несчастных случаев.

Комплексная оценка социального эффекта организации АРМ с ПР может быть дана с использованием формулы

$$C = \sum_{i=1}^n K_i F_i,$$

где C — комплексный критерий оценки социального эффекта; K — весовой коэффициент i -го показателя нагрузки; $i = 1, 2, \dots, n$ — число различных видов нагрузки на одном рабочем месте; F_i — степень нагрузки i -го вида (i -й показатель нагрузки).

Значение C определяют путем присвоения следующих значений F_i : 0 — малая нагрузка, 1 — умеренная, 2 — средняя, 3 — большая нагрузка.

Чем выше полученное значение C , тем выше и социальный эффект. Создание АРМ с ПР по социальным причинам считается:

целесообразным, если $C \geq 70$;

желательным, если $70 > C > 30$;

целесообразным, если $C \leq 30$.

Описанное изучение рабочих мест осуществляется для всего производственного процесса на предприятии (в цехе).

Данное рабочее место нельзя рассматривать изолированно, так как оно находится в непосредственной связи с рабочими местами предшествующим ему и следующим по ходу технологического процесса (с первого поступают, а на второе передаются объекты производства). Вот почему все рабочие места, для которых получены благоприятные значения критериев технической, экономической и социальной целесообразности автоматизации с использованием ПР (соответственно T , Σ и C), должны быть исследованы еще более внимательно с учетом предпосылок, наличие которых необходимо для повышения эффекта от создания АРМ с ПР. Целью дополнительного обследования является также составление задания по проектированию АРМ с ПР как составных звеньев данного производственного комплекса. В результате дополнительного обследования выявляется также, действительно ли необходимо внедрение ПР или же автоматизация может быть осуществлена и более простыми (и более дешевыми) техническими средствами.

Считается, что применение ПР при создании АРМ необходимо при следующих условиях:

- а) манипуляционная задача требует осуществления различных ходов, которые характерны не для всего цикла (например, для отделения брака или для изменения ориентировки детали, не находящейся в требуемом положении, а также в результате отказов, или для очистки, нанесения смазки в рабочей зоне);

- б) необходимы изменения в циклограмме АРМ для его перестройки;

- в) характер связей с другими АРМ требует изменений в местах подачи и отвода деталей.

Предпосылки повышения эффективности АРМ с ПР. Промышленные роботы — дорогие технические средства, все еще не настолько совершенные, чтобы осуществлять все манипуляционные функции, выполняемые людьми в производственных процессах. Считается, что эта задача должна быть вскоре решена. Но даже если бы мы и располагали роботами, способными заменить человека во всех операциях производственного процесса, то правильный подход заключался бы не в механической замене людей роботами, а в предварительном поиске возможностей упрощения манипуляционной задачи и уменьшения ее объема, чтобы внедрение АРМ с ПР дало больший эффект.

С другой стороны, чем больше возможности роботов, тем они сложнее и требуют более квалифицированного обслуживающего персонала.

Важно так организовать эксплуатацию АРМ с ПР, чтобы свести к минимуму их простои по техническим и организационным причинам.

Все эти соображения следует иметь в виду уже на самых ранних стадиях разработки проектов, включающих создание АРМ с ПР, чтобы добиться положительного эффекта при их внедрении.

Промышленные роботы могут манипулировать объектами, весьма различающимися массой, физическими и химическими свойствами, они выполняют сложные движения. Достигаются очень высокие ско-

рости (до 10 м/с) при весьма малых погрешностях позиционирования (до 0,02 мм). Можно считать, что по этим показателям роботы уже значительно превосходят людей. Однако все еще возникают затруднения в случае необходимости применять для манипулирования разными объектами один робот в одном рабочем цикле, а также при больших различиях между подвергающимися манипуляции деталями по форме, размерам или месторасположению. Ограничена «интеллигентность» ПР — их возможности принимать и обрабатывать информацию различного вида, поэтому они применяются для осуществления строго определенных (дефинированных) рабочих ходов в отсутствие помех, преодоление которых заранее не запрограммировано. Для этого необходимо «упорядочить» все пространство АРМ с ПР: в каждый момент времени детали, машины, инструменты и оборудование должны находиться в определенном положении. Применение оптических чувствительных устройств (телевизионные камеры), контролирующих местоположение и ориентацию деталей и их элементов и с помощью этой информации управляющих ПР, все еще очень дорого и имеет место лишь в отдельных случаях. Предпочтительна также организация АРМ, при которой процесс осуществляется ПР с одной рукой, с многократным повторением одних и тех же ходов с одними и теми же манипулируемыми деталями, без потребности в сложных чувствительных устройствах для наблюдения, например за деталями и инструментами в процессе обработки.

Экономический эффект от организации АРМ с ПР получается благодаря экономии рабочей силы (уменьшение расходов на заработную плату, добавки к ней, расходы на личные средства, обеспечивающие безопасность труда, и т. д.), повышения производительности рабочего места (сокращение цикла и повышение его частоты за рабочую смену), увеличение числа смен, стабилизации качества и уменьшения брака. Экономия средств уменьшает капитальные расходы на ПР и необходимые «периферийные устройства» (ориентирующие, контрольные, накопители, затяжные устройства и т. д.), цена которых доходит до цены ПР, расходы по инженерной деятельности, связанной с организацией АРМ (составляющие в среднем 50 % от стоимости ПР), текущие расходы (ремонт, плата за энергию, амортизация, арендная плата и т. д.).

Известно, что если в Болгарии один робот стоит 25 тыс. левов, то цена АРМ с таким ПР составит около 62 тыс. левов. Если при этом экономия за счет высвобождения одного человека составляет 5 тыс. левов, эксплуатация осуществляется в две смены, а срок окупаемости дополнительных капиталовложений составляет примерно три года, то после внедрения такого АРМ число работников в смене может составлять не более двух человек (если считать, что повышение производительности компенсирует текущие расходы на АРМ). С помощью таких подсчетов уже на самых ранних стадиях проектирования может быть определена допустимая сложность (и соответственно цена) ПР или число необходимых рабочих смен в день для эксплуатации АРМ. Ис-

ключения допускаются в тех случаях, когда решающим доводом в пользу создания АРМ с ПР является ожидаемый социальный эффект.

Можно сделать вывод, что при односменном режиме эксплуатации АРМ с ПР не бывают эффективными (за исключением некоторых дешевых ПР с цикловым программным управлением, например модульных ПР типа АДП 200 и АДП 1000). Экономический эффект применения АРМ с ПР может быть повышен не только путем увеличения коэффициента сменности, но и в результате упрощения манипуляционной задачи. Рассмотрим вкратце второй путь.

Упрощение манипуляционной задачи дает двойной эффект. Во-первых, может появиться возможность применения более простых и более дешевых ПР и «периферийных» устройств (цены на ПР колеблются в весьма широких границах: от 8 до свыше 50 тыс. левов), а во-вторых, может увеличиться объем работ, выполняемых одним ПР, и увеличиться число заменяемых им людей.

Применение групповой технологии играет важную роль в расширении объема работ, выполняемых одним роботом, при уменьшении числа его захватных устройств, ориентирующих устройств и снижении требований, предъявляемых к системе программного управления АРМ. Предпосылкой введения групповой технологии служит наличие на данном участке нескольких подобных рабочих мест, что позволяет создавать семейство деталей с близкими манипуляционными свойствами. Значительно большее значение для упрощения манипуляционной задачи имеет степень пригодности к автоматизированной обработке деталей или изделий, обрабатываемых на АРМ. Никогда не следует считать конструкции деталей, проходящих обработку или подвергающихся манипулированию на АРМ, неизменными. Часто существенные упрощения манипуляционной задачи бывают результатом изменений конструкций объектов, ведущих к облегчению выполнения таких операций, как их ориентирование, захват, затяжка, зажим и т. д., без ухудшения функциональных свойств.

Упростить манипуляционную задачу можно связывая два расположенных друг за другом рабочих места. Предпосылки таковы: одинаковый спектр обрабатываемых деталей, примерно одинаковое время обработки на обоих рабочих местах, пространственная близость рабочих мест или возможность расположить их недалеко друг от друга.

В последнее время для упрощения манипуляционной задачи все чаще применяется доставка обрабатываемых или монтируемых на АРМ деталей и транспортировка уже обработанных деталей или собранных узлов в магазинах. Такой прием сокращает время перенастройки по сравнению с временем, необходимым при использовании ориентирующих устройств, и тем самым повышает гибкость рабочего места, позволяет работать с деталями, неподходящими для автоматического ориентирования, и повышает надежность манипулирования. Они применяются, когда невозможно осуществить жесткую связь с предшествующим или следующим рабочим местом и многообразие деталей не слишком велико.

Эффективность АРМ можно существенно повысить, если ПР обслуживает несколько рабочих мест. Это возможно при достаточно продолжительном времени обработки и соответствующем расположении рабочих мест.

Максимальное число рабочих мест n , обслуживаемых одним ПР,

$$0 < \frac{\sum_{i=1}^n T_{mi}}{\sum_{i=1}^n T_{ni}} : 1 - n < 1,$$

где T_{mi} — время цикла работы i -й машины (от сигнала «старт» до сигнала «стоп» машины); T_{ni} — несовмещенное время работы ПР (от сигнала «стоп» до сигнала «старт» машины).

Эта формула не принимает во внимание вынужденные простои машин в ожидании ПР и ПР в ожидании машин, которые на практике имеют место из-за невозможности полной синхронизации работы машин и робота. Вот почему анализ возможностей обслуживания группы машин одним роботом сводится к минимизации вынужденных простоев путем моделирования совместной работы машин и обслуживающего ПР.

В заключение следует отметить, что главным условием успеха в деле организации АРМ с использованием ПР является создание предпосылок для успешного внедрения и текущего ремонта ПР. Для более эффективной организации текущего ремонта и приобретения соответствующих запасных частей следует внедрять одновременно не менее пяти ПР (наличие резервного робота считается оправданным в случае внедрения не менее пяти ПР).

Соблюдение рассмотренных принципиальных положений — необходимое условие достижения положительных результатов при создании АРМ с использованием ПР.

§ 9.5. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ ВНЕДРЕНИИ РОБОТОВ.

ВЫБОР И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА

В 9.4 § были рассмотрены принципиальные положения организации автоматических рабочих мест с использованием промышленных роботов. Их соблюдение помогает правильно выбрать на конкретном предприятии операции, при осуществлении которых целесообразно применение ПР. Затем успех этой деятельности в очень большой степени будет зависеть от подхода при выборе варианта организации АРМ с ПР и внедрении.

Выбор варианта организации АРМ с ПР — это решение многовариантной задачи. Из имеющихся необходимо выбрать наиболее подходящий ПР, определить, какие загрузочные, разгрузочные и прочие «периферийные» устройства самые лучшие, чтобы создать наиболее удачный компоновочный вариант, и т. д. Серьезные затруднения воз-

никают при этом из-за отсутствия полных, достаточно точных исходных данных для проектирования, а также наличия множества факторов, влияющих на выбор варианта и связанных между собой сложными зависимостями. Опыт внедрения АРМ с ПР показал, что ненаучный подход при их проектировании и внедрении часто становится причиной неприемлемых или неэффективных решений.

В последнее время системный подход при проектировании и внедрении АРМ с ПР применяется все чаще, что объясняется его достоинствами: он применим при разработке всех видов АРМ с ПР вне зависимости от характера технологического процесса, осуществляемого на данном рабочем месте, и от типа предприятия, на котором осуществляется внедрение; принимаются во внимание все значимые влияющие факторы и проектирование осуществляется поэтапно с постепенным повышением степени конкретности, создаются предпосылки для значительного облегчения труда проектировщика и конструктора благодаря использованию ЭВМ и т. д. Все это позволяет даже проектировщикам и конструкторам с небольшим опытом работы по внедрению, но владеющим научными методами проектирования и конструирования, а также имеющим достаточные знания устройства и принципов действия АРМ с ПР, находить эффективные решения.

Сущность системного подхода заключается в следующем:

- уточняется задача по разработке АРМ с ПР, подтверждается необходимость внедрения ПР, дополняются исходные данные для составления проекта, проверяется их достоверность;

- объект проектирования и конструирования (АРМ с ПР) изображается в виде технической системы, для описания которой используются соответствующие методы и средства;

- составляется множество возможных вариантов организации АРМ с ПР;

- выбираются критерии оценки и сравнения вариантов и принимается оптимальный вариант;

- составляется сетевой график конструирования и производства специальных устройств и поставок закупаемого оборудования, монтажа и испытаний АРМ с ПР, его подготовки к внедрению и самого внедрения в производство.

Сущность и описание технических систем. Под *технической системой* понимают часть материального мира, отделенную от окружающей ее среды и находящуюся с ней в определенных отношениях, имеющую определенную техническую функцию и определенную структуру.

Техническими системами могут считаться как сложные изделия, например АРМ с ПР, комплекс механизмов, автоматический цех и т. д., так и отдельные узлы, подузлы или детали (в зависимости от цели проектирования).

Окружающая среда технической системы является той частью материального мира, которая имеет к ней отношение. Окружающая среда за время существования системы изменяется, например, при производстве, испытаниях, транспортировке, внедрении, эксплуатации, об-

служивании, ремонте АРМ с ПР. Чтобы проектирование и конструирование дали хорошие результаты, необходимо возможно лучше понимать взаимодействие между системой и окружающей средой во время существования первой и вытекающие отсюда требования к конструкции системы.

Техническая функция выражает взаимосвязь между находящимися в функциональной зависимости входными и выходными величинами системы, в случае АРМ с ПР, например, во время его эксплуатации — между входными и выходными потоками материалов, энергии и информации. Техническая функция выражает типичные только для данной окружающей среды свойства системы.

Структура технической системы представляет множество образующих ее составных элементов и отношения между ними. Под *составным элементом* понимается отдельная деталь, узел или изделие, которые в процессе проектирования или конструирования более уже не расчленяются. Для АРМ с ПР основными составляющими элементами, например, будут станки, ПР, «периферийные» устройства. Множество составных элементов образует функциональное изделие, однако лишь в том случае, если эти элементы взаимозависимы и между ними существуют дифференцированные связи, называемые *отношениями*. При проектировании и конструировании АРМ с ПР нас интересуют главным образом такие отношения, которые описывают геометрическое относительно расположение составных элементов (мы называем их *отношениями размещения*) и определяют структуру системы и отклонения, от которых зависит функция системы, а также так называемые «связи», которые определяют функцию системы (перенос между составными элементами материалов, энергии или информации).

Структура технической системы может быть описана с помощью различных средств изображения и с различной степенью абстракции. В зависимости от этапа разработки основное внимание может уделяться функциональным свойствам или пространственно-материальным свойствам системы. На практике для этого применяются следующие способы описания.

1. Технический проект. Это наиболее конкретное структурное описание, количественно и целостно выражающее пространственно-материальные свойства технических изделий. Имеет вид технического чертежа.

2. Технические принципы (принцип работы или принцип функционирования). Это принципиальная схема структуры системы, на которой изображены пространственно-материальные свойства важных в функциональном отношении элементов. На схему не наносят не имеющие значения для функционирования системы элементы. С помощью знаков, напоминающих реальные объекты, как можно лучше изображается функционирование системы. В случае необходимости приводятся также функциональные параметры и проставляют стрелки, показывающие направления.

3. Функциональная структура (функциональная схема или функциональный план). Изображается совокупность функциональных элементов данной технической системы и связи между ними. Получается в результате дополнительного абстрагирования описания структуры, когда пренебрегают пространственно-материальными признаками и ограничиваются функциональными свойствами. При этом сохраняют форму элементов и изображения пространственной зависимости. Функциональная структура выражается блок-схемой. Предпосылкой такого описания служит образование функциональных элементов — относительно самостоятельных частей системы, осуществляющих определенные частные функции; их структура во внимание не принимается. Степень комплексности функциональных элементов зависит от охвата данной структуры и цели изображения. Часто разложение на составные части мы продолжаем до тех пор, пока не дойдем до известных функциональных элементов (в случае АРМ с ПР — до имеющихся стандартизированных или унифицированных составных элементов или же таких функционально обособленных единиц, которые применяются для компоновки АРМ с ПР). Функциональная структура — это наиболее абстрактное выражение структуры технической системы. Она применяется для систематизации возможных решений и для нахождения оптимального решения. В некоторых случаях с ее помощью объясняется функционирование больших систем.

Составление множества возможных вариантов организации АРМ с ПР. При решении многовариантных задач необходимо определить вариационные признаки (такие параметры решения, изменение которых дает альтернативные решения задачи), определить границы изменения вариационных признаков (возможные значения каждого параметра), чтобы выяснить возможности альтернативных решений задач путем объединения имеющих различные значения переменных параметров в общие структуры.

Для определения вариационных признаков при проектировании АРМ с ПР удобно бывает разложить общую функцию проектируемой системы на частные функции;

- подача объектов обработки на АРМ;

- отделение одной детали или порции деталей для обработки;

- взятие обрабатываемых деталей;

- помещение деталей в рабочую зону;

- закрепление деталей;

- обработка;

- съем деталей;

- отвод деталей из рабочей зоны;

- помещение деталей в палеты или передача их на следующее рабочее место;

- автоматизированная подача вспомогательных материалов;

- автоматизированное устранение отходов.

Для осуществления каждой частной функции могут быть применены различные функциональные элементы. С другой стороны, для ре-

шения одной и той же задачи можно подобрать различные частные функции и комбинировать их различно. При разложении общей функции на частные руководствуются следующими соображениями:

а) большое число частных функций дает возможность различных вариантов решения, но одновременно затрудняет нахождение оптимального варианта;

б) необходимо не только с помощью понятий дать определение каждой функции, но и найти ее входные и выходные значения;

в) проверить возможность осуществления каждой частной функции и возможного их объединения путем комбинирования в общую структуру в соответствии с целью системы;

г) определение функциональной структуры (совокупность частных функций и отношений между ними) является итеративным процессом, связанным с определением принципа действия и выбором функциональных элементов.

Множество возможных вариантов организации АРМ с ПР получают путем объединения различных функциональных устройств в структуры, выполняющие общую функцию проектируемой системы.

Это в сущности представляет решение следующих трех задач:

1. Создание функциональной структуры АРМ с ПР.

2. Поиск устройств (функциональных элементов) для осуществления частных функций.

3. Объединение (комбинирование) этих устройств в альтернативные структурно-компоновочные варианты (планировки) АРМ с ПР.

Главное требование, предъявляемое к создаваемой функциональной структуре, — гарантия осуществления технической функции АРМ с ПР и соответствие заданию.

При поиске функциональных элементов и разработке альтернативных вариантов необходимо выполнять многие требования: имеющаяся площадь должна быть достаточной для оборудования; должен быть обеспечен свободный и безопасный доступ к местам осуществления перенастройки; необходимо добиться совместимости с устройствами, доставляющими обрабатываемые детали и отводящими обработанные; должна быть обеспечена безопасность работающих на соседних рабочих местах; должны быть предусмотрены возможность замены ПР человеком в случае продолжительного отказа от работы и обеспечен доступ для загрузки и разгрузки рабочей зоны; необходимо свести к минимуму движения, не связанные с рабочими ходами; промышленный робот следует использовать как можно более рационально, возлагая на него многочисленные функции (если есть такая возможность, он должен обслуживать несколько станков); для создания АРМ с ПР следует подбирать преимущественно устройства, имеющиеся в продаже, и т. д.

При выборе возможных вариантов планировки АРМ с ПР рекомендуется по возможности располагать оборудование по окружности вокруг ПР, а при отсутствии такой возможности — в две параллельные линии, в крайнем случае — в одну линию. При выборе места для

ПР следует иметь в виду необходимость обеспечения безопасности, доступности, соблюдения циклового времени и возможно большей загрузки ПР.

Количественная оценка вариантов и выбор оптимальной структуры АРМ с ПР. Цель количественной оценки заключается в том, чтобы определить степень соответствия каждого варианта выбранным критериям. Существуют различные методы оценки, основывающиеся на одно- или многокритериальной оценке. При большом количестве возможных вариантов используются методы направленного поиска оптимального варианта [8]. Когда число возможных вариантов не слишком велико, для многокритериальной оценки часто применяют так называемый *метод общего полезного эффекта*, при котором каждое альтернативное решение оценивается по выбранным критериям с учетом их значимости (веса). Обычно выбирается от 7 до 12 критериев, а их вид зависит от цели оценки. В качестве критериев оценки следует выбирать требования, предъявляемые к конкретному АРМ с ПР, такие, например, как производительность, качество обработки, безотказность, возможность осуществления ремонта, занимаемая площадь, количество обслуживающих работников, продолжительность автоматической работы без вмешательства обслуживающего персонала (за исключением устранения отказов), энергоемкость, продолжительность вспомогательного времени для загрузки и разгрузки станка, технологическая гибкость (возможность перенастройки), совместимость с имеющимися в цехе станками и устройствами, пригодность для осуществления соответствующих технологических процессов и т. д.

Различные варианты будут соответствовать отдельным критериям в различной степени. С другой стороны, не все критерии одинаково важны для оценивающего. Вот почему для определения как важности критериев, так и степени соответствия данного варианта сумме всех критериев применяется следующая целевая функция, позволяющая выявить оптимальный вариант:

$$\Phi_s = \sum_{i=1}^n q_i F_{is},$$

где Φ — общий полезный эффект s -го варианта; q_i — весовой коэффициент i -го критерия оценки ($i = 1, 2, \dots, n$); F_{is} — степень удовлетворения i -го критерия вариантом с порядковым номером s ($s = 1, 2, \dots, m$).

При оптимальном варианте $\Phi_s \rightarrow \max$.

Для применения этих методов необходимо следующее.

1. Для каждого критерия составить шкалу его изменений. Для этого проводится анализ качества имеющихся АРМ с ПР, подобных проектируемому, учитываются тенденции их развития, а также принимаются во внимание данные задания, экономические соображения и т. д. Если степень удовлетворения данного критерия различными

вариантами не может быть выражена аналитически, то методом экспертной оценки ее можно выразить графически.

2. Определение весовых коэффициентов. В зависимости от важности данного требования соответствующему критерию присваивается весовой коэффициент. Один из методов определения весовых коэффициентов основывается на сравнении их друг с другом по парам. С этой целью строится матрица, в заглавный ряд и заглавную колонку которой вписываются критерии от K_1 до K_n . Ряды матрицы заполняются следующим образом. Сравнением критерия, ряд которого заполняем, со всеми остальными критериями и в соответствующие колонки записываем:

1 — если сочтем, что сравниваемые критерии одинаково важны;

2 — если сочтем, что критерий, ряд которого мы заполняем, более важен, чем тот критерий, с которым мы его сравниваем;

0 — если сочтем, что данный критерий менее важен, чем тот, с которым мы его сравниваем.

В каждом ряду суммируем числа и получаем коэффициенты a_i , которые пропорциональны значению соответствующих критериев. Нормируем их и искомые весовые коэффициенты подсчитываем по формуле

$$q_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}.$$

Описанный метод многокритериальной оценки может применяться как при выборе устройств (оборудования) для осуществления данной частной функции, так и для выбора оптимального структурно-компонентного варианта АРМ с ПР из нескольких возможных вариантов.

Выбор оптимального варианта АРМ с ПР осуществляется поэтапно, с постепенной конкретизацией решения. Первоначально путем определения общего полезного эффекта каждого из конкурентных вариантов сочетания частных функций определяется оптимальная функциональная структура. Затем из числа существующих устройств, дающих возможность осуществления данной частной функции, вновь посредством многокритериальной оценки с использованием тех же критериев выбирается оптимальное. Сочетание (комбинация) оптимальных решений частных функций и дает, наконец, оптимальный вариант АРМ с ПР.

Реализация и внедрение выбранной концепции АРМ с ПР. Убедившись в непротиворечивости внедрения АРМ с ПР, мы должны не только выбрать соответствующий оптимальный вариант, но и осуществить ряд операций, носящих уже более рутинный характер, но и более трудоемких. Необходимо точно определить эти виды работ, установить логическую связь и последовательность их осуществления, для чего

следует составить соответствующий сетевой график. Кроме того, необходимо правильно распределить время для осуществления различных операций. На основании анализа расходов времени на основные виды деятельности в процентах от общего времени: проектирование и конструирование -- 25 %; оптимизация -- 11 %; осуществление -- 53 %; пуск в действие -- 11 %.

В некоторых случаях внедрения АРМ с ПР, при наличии типовых устройств, проходящих для их организации, продолжительность всего цикла «проектирование -- внедрение» составляет до трех месяцев.

Очень важным условием соблюдения сроков внедрения АРМ с ПР является своевременное и качественное выполнение многих видов работ, представленных на сетевом графике. Так, например, на 1-м этапе следует изучить и проанализировать различные АРМ с ПР, подобные проектируемому; собрать данные, относящиеся к типовым устройствам и ПР, подходящие для создания данного АРМ, а также собрать достоверные исходные данные по проектированию; обеспечить поддержку со стороны руководства предприятия, на котором осуществляется внедрение; информировать работников, имеющих отношение к данному рабочему месту, и учесть их мнения; изучить опыт внедрения подобных АРМ и т. д. На 2-м этапе при выборе варианта АРМ с ПР необходимо: осуществить анализ рабочего места, подлежащего автоматизации; определить возможный экономический и социальный эффект внедрения АРМ с ПР; экспериментально проверить сомнительные решения; уточнить сроки внедрения; установить допустимые отклонения от содержащихся в задании требований; уточнить точки соприкосновения данного рабочего места с другими рабочими местами в цехе; определить требования техники безопасности и охраны окружающей среды; обеспечить необходимый период времени для остановки данного станка в процессе сборки и пуска в действие ПР и периферийных устройств; учесть квалификацию персонала, который будет обслуживать проектируемое АРМ с ПР. На 3-м этапе разрабатывают монтажный чертеж АРМ с ПР, определяют расположение устройств, ПР и станков, с тем чтобы минимизировать выполняемые ходы и продолжительность цикла. При этом обеспечивается удобный доступ для обслуживания и настройки, возможность замены ПР, обозначается пространство для ПР и принимаются меры по предупреждению несчастных случаев. Конструируются механизмы для фиксации ПР и периферийных устройств; создаются оригинальные периферийные устройства: захватные устройства, отсекатели, загрузочные устройства, магазины и пр.; защитные устройства. На 4-9-м этапах решаются задачи, описанные в сетевом графике. На 10-м этапе регистрируют все отказы, выявляют их причины и ищут меры по их устранению. Обучают обслуживающий персонал. Уточняют потребность в запасных частях. 11-й этап предназначен для изменения конструкции АРМ и ПР с целью ее усовершенствования и повышения надежности и производительности АРМ.

В заключение следует отметить, что для успешного внедрения АРМ ПР необходима совместная коллегиальная работа многих людей различных профессий и должностей, как разработчиков, так и внедрителей. От их совместных усилий и добросовестного выполнения своих обязанностей, вытекающих из описанных выше задач, зависят успех внедрения и его эффективность.

Глава 10

ТЕОРИЯ РАСЧЕТА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

§ 10.1. СТРУКТУРА И КИНЕМАТИКА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Структура промышленного робота. Структурно промышленный робот представляет собой совокупность механической системы и системы управления (рис. 10.1). Механическая система обеспечивает выполнение двигательных функций и реализацию операций технологического назначения. Ее часто называют собственно манипулятором. Конструктивно механическая система состоит из следующих основных узлов: приводов, подвижно соединенных звеньев и рабочего органа.

Подвижно соединенные звенья механической системы предназначены для воздействия на объект манипулирования или обрабатываемую (внешнюю) среду.

Рабочий орган — это узел механической системы ПР, обеспечивающий захватывание и удерживание в определенном положении объекта манипулирования.

Одна из основных проблем робототехники — изучение (исследование) вопросов, связанных с движением подвижных элементов робототехнических систем. Основой решения этих вопросов являются фундаментальные положения (теоремы, аксиомы) теоретической механики, теории механизмов и машин, теории упругости, теории устойчивости. На основе этих теорий определяется рациональная кинематическая и динамическая схемы манипулятора, оптимальные режимы его движения, обеспечивающие заданные требования по демпфированию колебательных процессов с учетом упругой податливости элементов манипулятора, и т. д. Кроме этих теорий, традиционно используемых для исследования задач движения абсолютно твердых и упругих тел, специалист по механике, занимаясь вопросами робототехники, должен уметь построить и исследовать динамическую модель привода. Для этого ему необходимо знать основы теории электрических машин, гидро- и пневмоустройств, теории следящих систем и т. д. И наконец, при рассмотрении задач автоматизации процессов управления движением нельзя обойтись без знания теоретических основ управления (оптимизации структур управления, выработки эффективных решений по управлению и т. д.), а также основ применения в системах управления

вычислительной техники и прежде всего методов формализации процессов управления и программирования.

Эффективность применения в практике робототехники перечисленных теоретических основ зависит от степени комплексного их использования на всех этапах создания и эксплуатации ПР. Назовем основные из этих этапов: проектирование ПР, его настройка на оптимальные параметры, управление ПР в реальном масштабе времени отработки технологической операции.

Этап проектирования ПР наиболее емок с точки зрения использования базовых теорий робототехники, так как помимо чисто конструкторских задач на этом этапе должны быть рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением эффективной эксплуатации ПР. В процессе проектирования ПР на основе общих требований, предъявляемых к нему со стороны заказчика, специалист по механике должен определить структуру манипулятора, его упругомассовые параметры, размеры звеньев, типы рабочих органов, типы приводов, режимы и алгоритмы управления движением. При этом могут быть использованы реализуемые в ЭВМ различные модели (кинематики и динамики манипулятора, динамики приводов, алгоритмов управления движением).

На этапе настройки ПР, т. е. в период подготовки его к работе, в зависимости от конкретных требований к ПР по отработке той или другой технологической операции человек — оператор регулирует некоторые характеристики ПР (прежде всего точность позициониро-

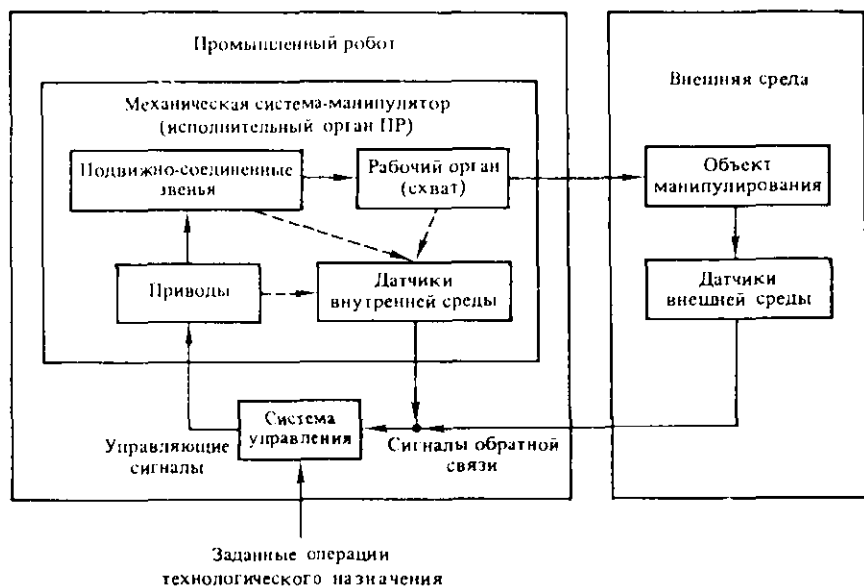


Рис. 10.1. Структура промышленного робота

вания ПР и его быстроедействие). С этой целью используются также реализуемые в ЭВМ оптимизационные модели функционирования ПР, построенные на базе динамических моделей манипулятора и привода ПР, а также имитационной модели системы управления ПР.

На этапе управления промышленный робот осуществляет целенаправленный выбор и реализацию управляющих воздействий, обеспечивающих отработку заданной технологической операции. При этом он располагает разработанными на этапе проектирования и отрегулированными на этапе настройки алгоритмами управления движением. Этап управления ПР характеризуется использованием для реализации алгоритмов управления только своей управляющей ЭВМ, а для автоматической системы управления — отсутствием человека-оператора в контуре управления ПР.

Сопоставительная оценка перечисленных этапов создания и эксплуатации ПР показала, что этапы проектирования и настройки, как правило, не имеют дефицита времени в их проведении. В то же время этап управления ПР всегда строго регламентирован по времени. Поэтому существенной особенностью этапов проектирования и настройки ПР является возможность использования алгоритмов, требующих значительных затрат машинного времени любой привлекаемой ЭВМ (как ЭВМ вычислительного центра, так и ЭВМ, непосредственно планируемой для использования в системе управления ПР). Для этапа управления ПР использование алгоритмов, требующих больших ресурсов времени ЭВМ, является в ряде случаев недопустимым. Все это свидетельствует о том, что при решении практических задач робототехники, прежде чем выбрать для реализации в ЭВМ тот или другой метод (алгоритм), необходимо сначала определить, к какому этапу создания и эксплуатации ПР относится рассматриваемый вопрос, и только после этого следует принимать решение по данному методу (алгоритму). В связи с этим в приведенных ниже материалах всегда делается акцент на область возможного их применения дифференцированно к рассмотренным выше этапам создания и эксплуатации ПР.

Кинематическая модель манипулятора и задачи ее анализа. Одной из основных задач робототехники является создание более совершенных систем управления роботом. Это требует прежде всего развития исследований в области анализа их кинематики и динамики. Анализ кинематики манипуляторов промышленных роботов является начальным этапом в задаче об управляемом целенаправленном движении робота-манипулятора. Манипулятор ПР состоит из звеньев, на которые наложены голономные, стационарные связи. Если особо не оговорено, то обычно все звенья манипулятора считаются абсолютно твердыми телами. Рабочий орган манипулятора ПР (захватное устройство) на первом этапе будем считать жестко связанным с последним звеном манипулятора. Некоторую точку рабочего органа, например его геометрический центр, назовем *характеристической точкой рабочего органа*.

Соседние звенья манипулятора образуют кинематические пары, т. е. такие соединения звеньев, которые допускают их относительное движение. Положение одного тела по отношению к другому определяется в общем случае шестью независимыми параметрами (три координаты произвольно выбранной точки в теле и три угла Эйлера), поэтому число условий связи, налагаемых на относительное движение каждой кинематической пары, может быть в пределах от одного до пяти. Число условий связи определяет класс кинематической пары, который характеризуется числом потерянных степеней свободы относительно движения. В манипуляторах, как правило, применяются кинематические пары 5-го класса, т. е. пары, обладающие одной степенью свободы, которая обеспечивает возможность вращения относительно некоторой оси, либо поступательного перемещения вдоль определенной оси. Эту ось называют *осью кинематической пары*.

Таким образом, кинематическая модель манипулятора представляет собой пространственную (иногда плоскую) многозвенную разомкнутую цепь, звенья которой последовательно соединены обычно кинематическими парами 5-го класса (вращательными цилиндрическими и поступательными телескопическими шарнирами). Каждое звено этой цепи является ведущим и приводится в движение от отдельного двигателя. В табл. 10.1 показаны типовые кинематические пары и их условные обозначения [21].

При описании манипулятора будем обозначать его звенья порядковыми номерами от 1 до n , начиная от звена, прикрепленного к основанию, которое обозначим номером 0 (рис. 10.2). В типовом случае, когда манипулятор состоит только из кинематических пар 5-го класса, число его степеней свободы (подвижности) будет равно числу подвижных звеньев (кинематических пар).

В общем случае число степеней свободы W манипулятора вычисляют по формуле Сомова - Малышева

$$W = 6n - \sum_{s=1}^5 SP_s,$$

где n — число подвижных звеньев; S — класс кинематической пары; P_s — число кинематических пар S -го класса.

Положение (конфигурацию) манипулятора в каждый момент времени определяют обобщенные координаты $\{q\} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$. Число обобщенных координат равно числу степеней свободы манипулятора. За обобщенные координаты $\{q\}$ удобно выбирать параметры, определяющие положение i -го звена по отношению к $(i - 1)$ -му, т. е. определяющие относительное перемещение двух соединенных между собой звеньев.

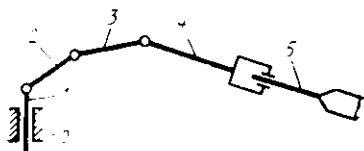
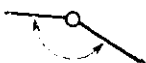
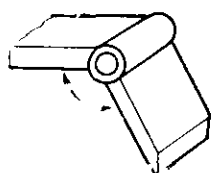
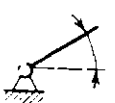
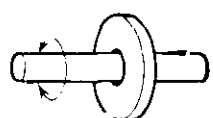
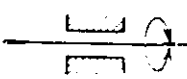
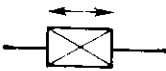
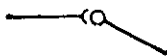
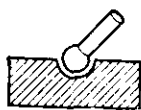


Рис. 10.2. Кинематическая цепь пятизвенного манипулятора

Т а б л и ц а 10.1. Типовые кинематические пары манипуляторов

Тип кинематической пары	Наименование	Условное обозначение	Типовой внешний вид
1-й	Изгиб		
	Изгиб с одним закрепленным звеном		
2-й	Вращение		
	Вращение с одним закрепленным звеном		
3-й	Линейное перемещение		
4-й	Шаровой шарнир		

На рис. 10.3 приведена схема простейшего двухзвенного манипулятора, перемещающего рабочий орган C в плоскости, и показаны обобщенные координаты q_1 и q_2 .

Задача кинематического анализа при заданной кинематической схеме с указанными размерами звеньев включает в себя определение функций положения характерных точек манипулятора (например, точки крепления схвата), скоростей, ускорений звеньев и точек манипулятора. Эти параметры необходимы для формирования законов управления приводами манипулятора, они определяют быстродействие и производительность робота. Следует также заметить, что точность

позиционирования в значительной степени зависит от структурно кинематической схемы манипулятора.

Матричный метод математического описания кинематической модели манипулятора. Для определения кинематических характеристик (перемещений, скоростей, ускорений) пространственного механизма со многими степенями свободы, каковым является манипулятор робота, необходим экономный, эффективный математический аппарат. В последнее время отдается предпочтение матричным методам, позволяющим единообразно представить не только механику манипулятора и объекта манипулирования, но и алгоритмы управления. Этот метод

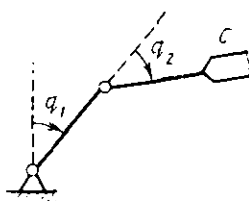


Рис. 10.3. Обобщенные координаты двухзвенового манипулятора

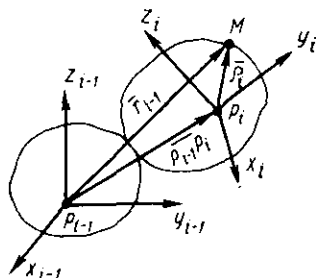


Рис. 10.4. Системы координат, жестко связанные со звеньями

основан на использовании матриц размера 4×4 , преобразующих так называемые однородные координаты точек трехмерного пространства [21, 22].

Однородными координатами точки в трехмерном пространстве называют любые четыре числа (x_1, x_2, x_3, x_4) , не все одновременно равные нулю, связанные с декартовыми координатами (x, y, z) равенствами

$$x = x_1/x_4, \quad y = -x_2/x_4, \quad z = x_3/x_4.$$

Однородные координаты определены неоднозначно. Если x_1, x_2, x_3, x_4 — однородные координаты некоторой точки, то числа $\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda x_3, \lambda x_4$ при $\lambda \neq 0$ тоже будут однородными координатами этой точки. Для каждой точки (x, y, z) пространства можно указать всегда четверку чисел, являющуюся ее однородными координатами (например, $(x, y, z, 1)$). Операции над векторами, заданными однородными координатами, определяются так, чтобы формулы, по которым вычисляются однородные координаты результирующего вектора, не противоречили формулам, в которых используются декартовы координаты.

Рассмотрим два соседних звена манипулятора $(i-1)$ -е и i -е, образующие кинематическую пару, допускающую их относительное перемещение (рис. 10.4). С этими звеньями жестко свяжем системы координат $p_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ и $p_i x_i y_i z_i$. Возьмем произвольную точку

$M(x_i, y_i, z_i)$ i -го звена и найдем ее координаты в системе, связанной с предыдущим звеном. Для этого достаточно знать координаты начала отсчета p_i в системе $p_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$, а также направляющие косинусы осей $x_i y_i z_i$ в системе $p_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$. Обозначим координаты начала отсчета p_i в системе $p_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ соответственно p_{1i}, p_{2i}, p_{3i} , а из направляющих косинусов составим матрицу

$$\begin{bmatrix} l_{1i} & l_{2i} & l_{3i} \\ m_{1i} & m_{2i} & m_{3i} \\ n_{1i} & n_{2i} & n_{3i} \end{bmatrix}. \quad (10.1)$$

На основании очевидного векторного равенства $\vec{r}_{i-1} = \overline{p_{i-1} p_i} + \overline{p_i M}$ координаты точки M в системе отсчета $p_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ определяются следующими соотношениями:

$$\begin{cases} x_{i-1} = l_{1i} x_i + l_{2i} y_i + l_{3i} z_i + p_{1i}; \\ y_{i-1} = m_{1i} x_i + m_{2i} y_i + m_{3i} z_i + p_{2i}; \\ z_{i-1} = n_{1i} x_i + n_{2i} y_i + n_{3i} z_i + p_{3i}. \end{cases} \quad (10.2)$$

Обозначим $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)$ — однородные координаты точки M в системе $p_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$, а $(x, y, z, 1)$ — однородные координаты этой точки в системе $p_i x_i y_i z_i$. Если перейти в (10.2) к однородным координатам, то (10.2) дополнится формальным тождеством

$$1 \equiv 1. \quad (10.3)$$

В результате система (10.2) и (10.3) может быть записана в виде:

$$\begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{1i} & l_{2i} & l_{3i} & p_{1i} \\ m_{1i} & m_{2i} & m_{3i} & p_{2i} \\ n_{1i} & n_{2i} & n_{3i} & p_{3i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10.4)$$

Сокращенно (10.4) представляют в виде

$$\{r_{i-1}\} = [A_i] \cdot \{p_i\}, \quad (10.5)$$

где

$$\{r_{i-1}\} = \{x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1\}^*, \quad \{p_i\} = \{x_i, y_i, z_i, 1\}^*,$$

$$[A_i] = \begin{bmatrix} l_{1i} & l_{2i} & l_{3i} & p_{1i} \\ m_{1i} & m_{2i} & m_{3i} & p_{2i} \\ n_{1i} & n_{2i} & n_{3i} & p_{3i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10.6)$$

Символ «**» обозначает операцию транспонирования вектора или матрицы.

Сокращенно матрицу $[A_i]$ записывают в виде

$$[A_i] = \begin{bmatrix} I_i & p_i \\ 000 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10.7)$$

где $[I_i]$ — подматрица направляющих косинусов (10.1).

Таким образом, два преобразования системы координат — преобразование параллельного переноса и поворота в однородных координатах — определяются одним матричным преобразованием вида (10.5).

В дальнейшем будем обозначать:

$[A_i]$ — матрица, определяющая положение системы координат, связанной с i -м звеном в системе координат, связанной с $(i-1)$ -м звеном; элементы этой матрицы зависят от обобщенной координаты q_i ; определяющей относительное перемещение $i-20$ и $i-1-20$ звеньев;

$[B_i]$ — матрица, определяющая положение системы координат, связанной с i -м звеном в неподвижной (инерциальной) системе координат;

матрица $[B_i]$ имеет, естественно, ту же структуру, что и матрица $[A_i]$.

Имеет место следующее рекуррентное соотношение [21, 22]:

$$[B_i] = [B_{i-1}] \cdot [A_i] \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (10.8)$$

$[B_0]$ — единичная матрица.

Пусть $\{r_i\} = \{x_i, y_i, z_i, 1\}^*$ радиус-вектор некоторой точки i -го звена в инерциальной системе координат, а $\{p_i\} = \{x'_i, y'_i, z'_i, 1\}^*$ радиус-вектор этой точки в системе координат, связанной с i -м звеном. Тогда можно записать соотношение

$$\{r_i\} = [A_1] \cdot [A_2] \dots [A_i] \{p_i\} = [B_i] \{p_i\}. \quad (10.9)$$

Выражение (10.9) представляет собой форму записи векторного уравнения кинематики манипулятора и устанавливает зависимость между обобщенными координатами манипулятора и декартовыми координатами произвольной точки манипулятора.

Удобно иметь в памяти ЭВМ для каждого звена манипулятора соответствующие матрицы $[B_i]$ как важнейшие характеристики положения, с помощью которых могут быть получены различные кинематические характеристики.

Будем обозначать $[\dot{B}]$ матрицу, состоящую из первых производных по времени элементов матрицы $[B]$, а матрицу из вторых производных по времени обозначать $[\ddot{B}]$. Тогда векторы скорости $\{\dot{r}_i\} = \{\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, 0\}^*$ и ускорения $\{\ddot{r}_i\} = \{\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i, 0\}^*$ произвольной точки i -го звена манипулятора определяются соответственно соотношениями:

$$\{\dot{r}_i\} = [\dot{B}_i] \{p_i\}; \quad (10.10)$$

$$\{\ddot{r}_i\} = [\ddot{B}_i] \{p_i\}. \quad (10.11)$$

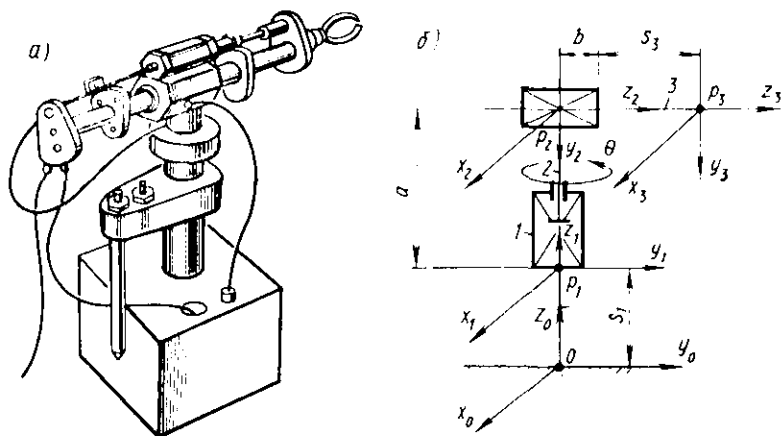


Рис. 10.5. Промышленный робот ПР-4

При получении (10.10) и (10.11) было учтено, что по отношению к системе координат, связанной неразрывно со звеном, вектор $\{p_i\}$ не меняется, т. е. является константой.

При обратных преобразованиях вместо матриц $[A_i]$ требуется обратная матрица $[A_i^{-1}]$, которая определяет положение системы координат, связанной с $(i-1)$ -м звеном, в системе координат, связанной с i -м звеном.

Обратную матрицу $[A_i^{-1}]$ можно выразить через элементы матрицы $[A_i]$ следующим образом [21]:

$$[A_i^{-1}] = \begin{bmatrix} l_i & 1 & l_i p_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Пример решения задачи кинематики. Составим уравнения кинематики для промышленного робота ПР-4 с тремя степенями свободы (рис. 10.5). Рабочими движениями этого робота являются вертикальное перемещение звена 1, поворот звена 2 и выдвижение «руки» 3, несущей схват. Системы координат $p_i x_i y_i z_i$ ($i = 1, 2, 3$) неразрывно связаны с соответствующими звеньями (рис. 10.5, б), а $o x_0 y_0 z_0$ — инерциальная система координат (рис. 10.5, б). Начало систем координат, связанной с i -м звеном, выбираем в точке, принадлежащей общему перпендикуляру к осям z_{i-1} и z_i ; ось z_i направляем вдоль оси сочленения (оси кинематической пары), соединяющей звенья i -е и $(i+1)$ -е; ось x_i направляем вдоль общего перпендикуляра к осям z_{i-1} и z_i . За положительное направление x_i можно брать направление вектора $z_{i-1} \times z_i$. Ось y_i выбираем так, чтобы у всех систем координат была одинаковая ориентация, например правая.

Последнюю систему координат ориентируем по схвату. Начало координат помещаем в характеристическую точку рабочего органа, ось z_n направляем в продольном направлении схвата; ось y_n — в поперечном. В последнее время подобный выбор связанных систем координат наиболее часто применяется [21, 22]. Это объясняется тем, что в этом случае число параметров, входящих в матрицу $[A_i]$, будет минимальным.

В качестве обобщенных координат выбираем параметры, характеризующие перемещение одного звена по отношению к предыдущему: $q_1 = s_1; q_2 = \theta; q_3 = s_3$.

В рассматриваемом случае необходимые кинематические соотношения можно было бы получить непосредственно из геометрии механизма, однако для иллюстрации изложенного метода используем матрицы преобразования $[A_i]$ ($i = 1, 2, 3$), характеризующие относительное положение звеньев. Применение матричного метода при рассмотрении манипуляторов другой кинематической схемы и с большим числом степеней свободы, когда затруднительно получить необходимые кинематические соотношения непосредственно из геометрии механизма, существенно упростит и формализует решение задачи кинематики:

$$[A_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [A_2] = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$[A_3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b+s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Выпишем матрицы преобразования (10.8) $[B_i]$ ($i = 1, 2, 3$), характеризующие положение звеньев в инерциальной системе координат:

$$[B_1] = [A_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [B_2] = [B_1] \cdot [A_2] = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & a+s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$[B_3] = [B_2] \cdot [A_3] = [B_1] \cdot [A_2] \cdot [A_3]$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & -(b+s_3) \sin \theta \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & (b+s_3) \cos \theta \\ 0 & -1 & 0 & a+s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Определим координаты характеристической точки рабочего органа p_3 в инерциальной системе координат $x_0 y_0 z_0$ на основании соотношения (10.9):

$$\{r_{p_3}\} = [B_3] \{\rho_{p_3}\}, \quad \text{или}$$

$$\begin{Bmatrix} x_{p_3} \\ y_{p_3} \\ z_{p_3} \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & -(b+s_3) \sin \theta \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & (b+s_3) \cos \theta \\ 0 & -1 & 0 & a+s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}.$$

В результате умножения матриц получим

$$\{r_{p_3}\} = \begin{Bmatrix} -(b+s_3) \sin \theta \\ (b+s_3) \cos \theta \\ a+s_1 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (10.12)$$

Скорость и ускорение точки p_3 определяются соответственно соотношениями:

$$\{v_{p_3}\} = \{\dot{r}_{p_3}\} = \begin{Bmatrix} v_{p_3 x_0} \\ v_{p_3 y_0} \\ v_{p_3 z_0} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -(b + s_3) \cos \theta \cdot \dot{\theta} - \dot{s}_3 \sin \theta \\ -(b + s_3) \sin \theta \cdot \dot{\theta} + \dot{s}_3 \cos \theta \\ \dot{s}_1 \\ 0 \end{Bmatrix};$$

$$\{a_{p_3}\} = \{\ddot{r}_{p_3}\} = \begin{Bmatrix} a_{p_3 x_0} \\ a_{p_3 y_0} \\ a_{p_3 z_0} \\ 0 \end{Bmatrix} =$$

$$= \begin{Bmatrix} -2\dot{s}_3 \dot{\theta} \cos \theta - (b + s_3) \cos \theta \cdot \ddot{\theta} + (b + s_3) \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 - \ddot{s}_3 \sin \theta \\ -2\dot{s}_3 \dot{\theta} \sin \theta - (b + s_3) \sin \theta \cdot \ddot{\theta} - (b + s_3) \cos \theta \cdot \dot{\theta}^2 + \ddot{s}_3 \cos \theta \\ \ddot{s}_1 \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

Решение прямой и обратной задачи кинематики. Прямая задача кинематики состоит в следующем: необходимо определить положение и ориентацию рабочего органа манипулятора в инерциальной системе координат, т. е. матрицу $4 \times 4 [B_n]$, если известны значения всех его обобщенных координат q_i ($i = 1, 2, \dots, n$). При выводе уравнений (10.9) по существу решалась прямая кинематическая задача. Таким образом для простой кинематической цепи, один конец которой крепится к неподвижной стойке, а другой конец представляет собой рабочий орган (захватное устройство), прямая задача решается путем перемножения матриц положения $[A_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$)

$$[B_n] = [A_1] \cdot [A_2] \dots [A_n], \quad (10.13)$$

где матрица $[A_i]$ определяет положение i -го звена манипулятора относительно $(i - 1)$ -го.

Необходимость в решении такой задачи возникает, когда текущее положение рабочего органа не может быть измерено непосредственно датчиком, в то время как относительные перемещения звеньев (обобщенные координаты манипулятора) могут быть определены с помощью соответствующих потенциометрических датчиков.

Большое значение при проектировании робота и программировании его движений представляет обратная задача кинематики. Суть этой задачи заключается в нахождении обобщенных координат манипулятора q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) по заданному положению и ориентации его рабочего органа (по заданной матрице $[B_n]$).

Таким образом, обратная задача кинематики манипулятора сводится к решению нелинейной системы уравнений (10.13). Аналитическое решение этой задачи для манипулятора общего вида весьма за-

труднительно. Эта задача успешно решается только для конкретных кинематических схем манипуляторов с небольшим числом степеней свободы.

Характерной особенностью решения обратных задач кинематики является многозначность. Если обратная задача дает многозначное решение, то выбирается такое решение, которое дает, напримр, траекторию наискорейшего действия.

Существует множество методов решения этой подчас сложной задачи [1, 2, 3, 4, 5]. Решение обратной задачи кинематики для конкретных кинематических схем приведено в [21, 22].

Для манипуляторов с большей кинематической избыточностью, когда число степеней свободы $n > 6$, необходимо использовать методы решения уравнений (10.13), ориентированные на ЭВМ. Примерами таких методов решения обратной задачи служат оптимизационные методы покоординатного и наискорейшего спуска, метод возможных направлений [1] и т. д.

Расчет рабочей зоны, длин звеньев, ограничений в суставах манипулятора по уравнениям кинематики. Совокупность положений рабочего органа манипулятора при его различных конфигурациях называется *рабочей зоной*. Рабочая зона является важнейшей эксплуатационной характеристикой робота и определяет возможность его согласования с обслуживаемым технологическим оборудованием.

Уравнения кинематики (10.9) устанавливают зависимость между геометрическими размерами звеньев манипулятора, обобщенными координатами и координатами любой точки манипулятора, в том числе и характеристической точкой рабочего органа. Эту зависимость можно использовать на этапе проектирования робота при определении ограничений, налагаемых на движение звеньев, и при определении размеров звеньев механизма с известной кинематической схемой, рабочая зона которого заведомо включает заданные точки позиционирования.

Рассмотрим решения этой задачи на примере плоского двухзвенного манипулятора, кинематическая схема которого изображена на рис. 10.6. В рассматриваемом примере уравнения кинематики (10.9) можно получить непосредственно из геометрии механизма. Принимая за обобщенные координаты углы относительных поворотов звеньев

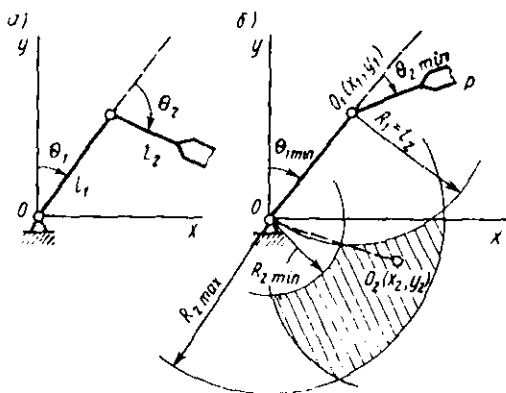


Рис. 10.6. Рабочая зона манипулятора

соответственно $q_1 = \theta_1$ и $q_2 = \theta_2$. При этом координаты характеристической точки рабочего органа манипулятора (точка P) определяются следующими соотношениями (рис. 10.6):

$$\begin{cases} x_p = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2); \\ y_p = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2). \end{cases} \quad (10.14)$$

Считаем заданными предельные значения обобщенных координат $\theta_{i\text{мин}}, \theta_{i\text{макс}}$ ($i = 1, 2$), определяемых конструктивными ограничениями. При предельных значениях обобщенных координат характеристическая точка будет находиться на границе рабочей зоны манипулятора. Необходимо определить уравнение границ рабочей зоны.

На основании (10.14) можно получить следующие два уравнения:

$$\begin{cases} (x_p - l_1 \sin \theta_1)^2 + (y_p - l_1 \cos \theta_1)^2 = l_2^2; \\ x_p^2 + y_p^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2, \end{cases} \quad (10.15)$$

которые представляют собой уравнения окружностей с радиусами

$$R_1 = l_2, \quad R_2 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2}$$

и координатами центров соответственно

$$x_1 = l_1 \sin \theta_1; \quad y_1 = l_1 \cos \theta_1; \quad x_2 = 0; \quad y_2 = 0. \quad (10.16)$$

Границы рабочей зоны представляют собой дуги окружностей, определяемых уравнениями (10.15), так как диапазон изменения углов θ_i ($i = 1, 2$) ограничен ($\theta_{1\text{мин}} \leq \theta_1 \leq \theta_{1\text{макс}}, \theta_{2\text{мин}} \leq \theta_2 \leq \theta_{2\text{макс}}$).

Для построения рабочей зоны прежде всего необходимо из центра $O(0, 0)$ провести две окружности радиусами

$$R_{2\text{мин}} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_{2\text{макс}}};$$

$$R_{2\text{макс}} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos \theta_{2\text{мин}}}.$$

Аналогично, из центров O_1 и O_2 с координатами x_1, y_1 (10.16), соответствующими $\theta_{1\text{мин}}$ и $\theta_{1\text{макс}}$, необходимо построить еще две окружности. Фигура, очерченная проведенными дугами окружностей, определяет форму и положение рабочей зоны манипулятора (на рис. 10.6, б заштрихована).

Следует отметить, что при соотношении длин звеньев $l_2/l_1 = 1$ при заданных диапазонах изменения углов θ_i ($i = 1, 2$) площадь рабочей зоны оказывается наибольшей, поэтому обычно принимают $l_1 = l_2 = l$. По заданным точкам позиционирования нужно выбрать такую форму рабочей зоны, чтобы она включала в себя заданные точки.

Определим длины звеньев манипулятора, считая их равными, из условия попадания характеристической точки рабочего органа в самую удаленную от начала координат точку позиционирования $M_i(x_i, y_i)$

$$l_1 = l_2 = \frac{1}{2} \max (\sqrt{x_i^2 + y_i^2}).$$

При известных длинах звеньев манипулятора и координатах точек позиционирования (x_i, y_i) можно определить границы изменения обобщенных координат (углов поворота), обеспечивающих попадание рабочего органа в требуемые точки. Так, из (10.14) следует

$$\theta_{1i} = \arccos \frac{y_i(x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2) + x_i \sqrt{4l_1 l_2 - (x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2)^2}}{2l_1(x_i^2 + y_i^2)};$$

$$\theta_{2i} = \arccos \frac{(x_i^2 + y_i^2) - (l_1^2 + l_2^2)}{2l_1 l_2}.$$

По существу, выше проиллюстрированы примеры использования прямой и обратной задачи кинематики при проектировании ПР.

Построение программных траекторий манипулятора при управлении ПР. Задача построения программных траекторий манипулятора состоит в том, чтобы по заданному перемещению и ориентации рабочего органа в рабочей зоне определить, как следует изменять со временем обобщенные координаты $(q_1, q_2, \dots, q_n)$.

При управлении ПР положения и ориентации рабочего органа определяются на первом этапе решения задачи планирования поведения ПР. Сущность этого этапа планирования состоит в определении способа взятия рабочим органом объекта манипулирования, определении траектории (совокупности положений и ориентаций) перемещения схвата с объектом манипулирования. При этом необходимо учитывать всевозможные препятствия в рабочей зоне манипулирования, ограничения в сочленениях манипулятора и т. д. В процессе такого планирования определяется также некоторое число промежуточных узловых точек траектории перемещения рабочего органа, находящихся между исходной и конечными точками движения. Далее для каждой такой узловой точки M_i ($i = 0, 1, \dots, m$) решается обратная задача кинематики о положении механизма, т. е. находятся значения соответствующих обобщенных координат механизма $q_1^i, q_2^i, \dots, q_n^i$ ($i = 0, 1, \dots, m$; n — число степеней свободы). В результате получается матрица (10.17) значений обобщенных координат размера $(m+1) \times n$.

Решение обратной задачи кинематики при управлении ПР представляет собой основное содержание второго этапа планирования поведения ПР.

Однако задача построения программной траектории не заканчивается построением матрицы дискретных значений обобщенных координат (10.17). Необходимо построить желаемый закон изменения обобщенных координат со временем $q_j(t)$ ($j = 1, 2, \dots, n$). При этом построенные функции $q_j(t)$ должны совпадать в определенные моменты времени с найденными выше дискретными значениями обобщенных координат (10.17), т. е. должно выполняться условие

$$q_j(t_i) = q_j^i; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m),$$

M_0	M_1	M_2	...	M_m
$q_1^{(0)}$	$q_1^{(1)}$	$q_1^{(2)}$	...	$q_1^{(m)}$
$q_2^{(0)}$	$q_2^{(1)}$	$q_2^{(2)}$	...	$q_2^{(m)}$
$q_3^{(0)}$	$q_3^{(1)}$	$q_3^{(2)}$	...	$q_3^{(m)}$
...	...	...	...	...
$q_n^{(0)}$	$q_n^{(1)}$	$q_n^{(2)}$	...	$q_n^{(m)}$

(10.17)

где $t_0, t_1, \dots, t_m$ — последовательность точек разбиения интервала времени $[0, T]$ движения манипулятора.

Кроме того, для обеспечения более качественного управления на эти функции могут быть наложены некоторые другие ограничения (например, ограничения на скорость и ускорение в начале и конце движения и т. п.).

Построение закона изменения обобщенных координат со временем в процессе управления ПР осуществляется в подсистеме директивного управления ПР. Алгоритм формирования этого закона, т. е. алгоритм формирования программной траектории $q_j(t)$, ($j = 1, 2, \dots, n$) по ее дискретному приближению (10.17), предполагает решение двух задач:

определение продолжительности интервала движения T , на котором реализуется заданная операция, и разбиение этого интервала на необходимое число отрезков;

интерполяция программной траектории, т. е. определение обобщенных координат q_j ($j = 1, 2, \dots, n$), для любого текущего момента времени.

Зная динамические характеристики приводов манипуляторов, можно найти приемлемые значения для узлов интерполяции ($0T$) по формулам

$$t_{i+1} = t_i + \max_{1 \leq j \leq n} \frac{|q_j^{(i+1)} - q_j^{(i)}|}{v_{\max}^j} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m; t_0 = 0), \quad (10.18)$$

где $v_{\max}^j$ — максимально допустимая скорость движения j -го привода.

Как следует из (10.18), время прохождения манипулятором каждого из отрезков программной траектории определяется следующим

образом: для каждого из звеньев определяется наименьшее время необходимое для осуществления данного перемещения (от $q_j^{(i)}$ до $q^{(i+1)}$). Максимальное значение из найденных времен принимается за время движения для всех звеньев манипулятора.

Таким образом, продолжительность интервала движения T , на котором реализуется данная операция,

$$T = t_T = t_0 + \sum_{i=1}^m |\Delta_i|,$$

где $|\Delta_i| = t_{i+1} - t_i$.

Рассмотрим вторую задачу, а именно задачу построения программной траектории $q_j(t)$, ($j = 1, 2, \dots, n$) по ее «дискретному приближению» (10.17) и узлам интерполяции, заданным соотношениями (10.18). Эту задачу в основном решают на основе приближения обобщенных координат так называемыми «сплайнами». Сплайном порядка n называется функция, являющаяся многочленом степени n на каждом из отрезков $[t_i, t_{i+1}]$ ($i = 0, 1, 2, \dots, m$)

$$P_{in}(t) = a_{i0} + \dots + a_{in}t^n, \quad t_{i-1} \leq t \leq t_i, \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (10.19)$$

и удовлетворяющая условиям непрерывности, а также непрерывности производных порядка $n - 1$ в точках $t_1, \dots, t_{m-1}$.

Таким образом, в (10.19) имеется $m(n + 1)$ неизвестных коэффициентов (m отрезков, т. е. m сплайнов и $(n + 1)$ коэффициентов в каждом сплайне).

Сплайн-функции строятся по очереди для каждой обобщенной координаты q_j ($j = 1, 2, \dots, n$), т. е. для каждой строки матрицы узловых точек (10.17).

Простейшей функцией, удовлетворяющей условию непрерывности, может быть линейный сплайн ($n = 1$) (рис. 10.7):

$$P_{i1}^{(j)} = a_{i0}^{(j)} + a_{i1}^{(j)}t, \quad t_{i-1} \leq t \leq t_i, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (10.20)$$

Таким образом, при построении функций $q_j(t)$ для j -го привода манипулятора с помощью линейных сплайнов получается $2m$ неизвестных параметров $a_{i0}^{(j)}, a_{i1}^{(j)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$). Для определения этих параметров существует $2m$ условия, а именно $m + 1$ условие совпадения значений сплайна со значениями соответствующей обобщенной координаты q_j в узловых точках $t_0, t_1, \dots, t_m$ и $m - 1$ условие непрерывности сплайнов в этих же узловых точках [т. е. совпадение в узловых точках соответствующих сплайнов $P_{i1}(t_i) = P_{(i+1)1}(t_i)$].

Исполнительный механизм манипулятора с приводами представляет собой динамическую систему, способную обрабатывать достаточно плавные управляющие сигналы. Кусочно-линейный сигнал в случае интерполяции обобщенных координат линейными сплайнами при точном его выполнении порождает резкие импульсы ускорений и, следовательно, перегрузки, поэтому с целью улучшения качества уп-

равления целесообразно использовать сплайны более высокого порядка (рис. 10.8). При выборе порядка сплайнов учитывают, что в узлах интерполяции t_i ($i = 0, 1, \dots, m$) наложены ограничения на обобщенные координаты, скорости и ускорения. При этом для промежуточных интервалов времени ограничения на скорости и ускорения являются по существу условиями непрерывности сплайнов. Для начального и конечного моментов времени при наложении ограничений на скорость и ускорение необходимо учитывать практические потребности. Так, например, может оказаться целесообразным начинать движение и заканчивать его с нулевой скоростью и ускорением и т. п.

Таким образом, имеется только четыре ограничения для каждого из промежуточных интервалов времени и пять для каждого из крайних

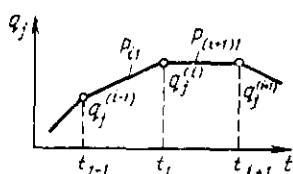


Рис. 10.7. Кусочно-линейная программная траектория

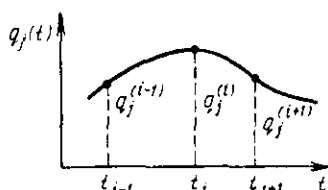


Рис. 10.8. Непрерывная программная траектория

интервалов. В этом случае первому и последнему интервалам времени удовлетворяют полиномы четвертого порядка, а промежуточным полиномы третьего порядка. При построении программных траекторий основная трудность возникает на этапе решения обратной задачи кинематики, особенно при наличии в зоне манипулирования препятствий. В связи с этим возникли три уровня автоматизации процесса построения программных траекторий и связанных с ними три уровня автоматизации аналитического расчета управляющих программ ПР: уровень отдельных степеней подвижности, уровень манипулятора, объектный уровень.

Уровень отдельных степеней подвижности предусматривает задание человеком-оператором движения манипулятора в терминах значений обобщенных координат его звеньев. При этом обратная задача кинематики манипулятора ПР должна быть решена вне системы управления ПР оператором вручную или с помощью средств автоматизации технологической подготовки производства на этапе подготовки ПР к работе.

При программировании ПР на уровне манипулятора человек-оператор не должен заботиться о состоянии отдельных степеней подвижности, т. е. обобщенных координат q , а должен задавать положение (координаты) и ориентацию рабочего органа ПР в узловых точках перемещения рабочего органа. При таком программировании обратная задача кинематики решается в управляющей ЭВМ ПР на

этапе подготовки его к работе или непосредственно в реальном масштабе времени выполнения технологической операции.

При программировании ПР на объектном уровне человеком-оператором задается только технологическая операция, которую должен выполнить ПР, а формирование значений положений и ориентаций рабочего органа и определение обобщенных координат манипулятора (решение обратной задачи) должно осуществляться в управляющей ЭВМ ПР на этапе подготовки ПР к работе или в период выполнения им технологической операции.

Каждому рассмотренному уровню автоматизации соответствуют свои специализированные или универсальные языки программирования ПР. При использовании для формирования управляющих программ ПР метода обучения обратная задача кинематики не решается.

Задача построения закона изменения обобщенных координат манипулятора со временем всегда решается в управляющей ЭВМ ПР как при методе обучения ПР, так и при всех уровнях автоматизации формирования управляющих программ методом аналитического расчета.

§ 10.2. ДИНАМИКА МАНИПУЛЯТОРОВ

Расчетная схема динамической модели манипулятора и задачи ее анализа. Конструирование роботов требует изучения динамики его исполнительного органа (манипулятора) как объекта управления. Первым этапом динамического исследования является составление динамической модели — идеализированной расчетной схемы механизма и математическое описание ее. Модель выбирается для проведения конкретных исследований и основывается, как правило, на ряде допущений. Естественно, что изменение допущений приводит к изменению модели.

В настоящее время в основном манипуляторы промышленных роботов представляются в виде дискретных моделей с ограниченным числом степеней свободы, в которых инерциальные свойства механизма отображаются в виде сосредоточенных масс и моментов инерции, соединенных упругодиссипативными, геометрическими или кинематическими связями.

На рис. 10.9 представлены три расчетные схемы исполнительного органа промышленного робота ПР-4. Схема рис. 10.9, а основана на допущении о недеформируемости звеньев. Она может быть использована при решении следующих двух задач динамики роботов:

- определение закона движения звеньев манипулятора при учете известной системы сил, действующих на него;
- определение закона изменения управляющих воздействий для реализации заданного движения манипулятора.

Схема рис. 10.9, б учитывает упругую податливость механизмов приводов. Она позволяет исследовать колебания механизма, неизбежно возникающие при быстром разгоне и резком торможении его звеньев, а также оценить их влияние на основные характеристики манипуляторов, на точность позиционирования рабочего органа. Схему

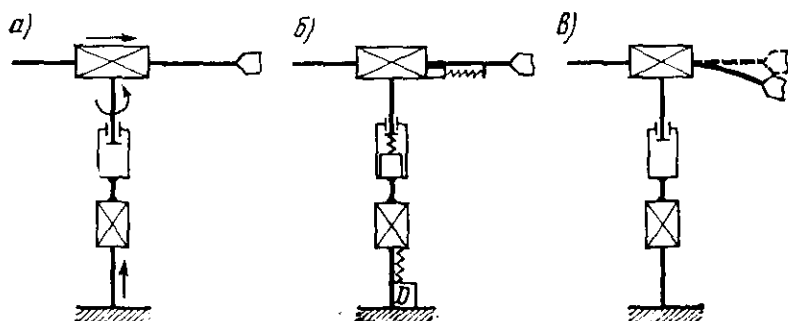


Рис. 10.9. Расчетная схема динамической модели манипулятора

рис. 10.9, в используют при оценке влияния упругости звена на динамику манипулятора.

Определение приведенных упругомассовых параметров манипулятора. При исследовании динамики манипулятора ПР упругомассовые параметры (характеристики) расчетной модели определяют из условий равенства кинетической и потенциальной энергии реального механизма и модели. Распределенные массы и моменты инерций звеньев реального механизма заменяют сосредоточенными — так называемыми приведенными массами и моментами инерции. Значения приведенных масс и моментов инерции определяют из условия равенства кинетических энергий реальной и расчетной системы:

$$T = T_{\text{пр}} \quad (10.21)$$

В качестве примера определим момент инерции механизма привода звена манипулятора (рис. 10.10), приведенный к выходному валу.

Кинетическая энергия реального механизма

$$T = 0,5J_d \omega_d^2 + 0,5J_1 \omega_d^2 + 0,5J_2 \omega_{3,м}^2 + 0,5J_{3,м} \omega_{3,м}^2, \quad (10.22)$$

где $J_d, J_1, J_2, J_{3,м}$ — моменты инерции соответственно двигателя, двух зубчатых колес и звена манипулятора относительно их собственных осей вращения; $\omega_d, \omega_{3,м}$ — угловые скорости вращения двигателя и звена манипулятора.

Кинетическая энергия расчетной модели

$$T_{\text{пр}} = 0,5J_{\text{пр}} \omega_{3,м}^2. \quad (10.23)$$

Приравнявая, согласно (10.21), правые части соотношений (10.22) и (10.23), определим приведенный момент инерции механизма привода к выходному валу:

$$J_{\text{пр}} = (J_1 + J_d) i_{12}^2 + J_2 + J_{3,м},$$

где $i_{12} = z_2/z_1$ — передаточное отношение зубчатых колес.

При построении расчетной модели механизма может также возникнуть задача о приведении моментов или усилий, действующих на одно из тел механизма, к другому телу. Приведенные силы и моменты определяются на основе утверждения теоретической механики, что две системы сил, производящих одну и ту же виртуальную работу, динамически эквивалентны.

В качестве примера рассмотрим механизм привода звена манипулятора (рис. 10.10). Приведем момент M_d , приложенный к валу двигателя, к выходному звену механизма. Элементарные работы в реальном механизме и приведенной системе определяются соответственно по формулам

$$\delta A = M_d \delta \varphi_d; \quad \delta A_{пр} = M_{пр} \delta \varphi_{з.м.}$$

Из условия равенства элементарных работ $\delta A = \delta A_{пр}$ получим

$$M_{пр} = M_{i12}, \quad (10.24)$$

где $i_{12} = z_2/z_1$ — передаточное число.

Поясним, что в дальнейшем будем подразумевать под упругой податливостью механизмов приводов. Пусть ступица ведомого колеса закреплена, а к ступице ведущего колеса приложен крутящий момент M . Из-за упругой податливости зубьев колес, а также упругости других элементов ступица ведущего колеса повернется на некоторый угол φ . Считая упругие характеристики всех элементов линейными, можно принять, что угол поворота φ пропорционален моменту M . Отношение $\varphi = M/\varphi$ будет называться *жесткостью*, а обратная ей величина $e = \varphi/M$ — *податливостью* зубчатой передачи.

Следует заметить, что для вычисления податливости e (Н·см) зубчатой передачи со стальными колесами существует эмпирическая зависимость [23]:

$$e = 1/kr^2 b,$$

где r — радиус ведущего колеса, см; b — ширина зубчатого венца, см; $k \approx 150 \cdot 10^4$, Н/см² — коэффициент пропорциональности. В общем под коэффициентом жесткости (жесткостью) подразумевается коэффициент пропорциональности между силой (моментом) и упругим перемещением.

Для звеньев манипулятора при определении жесткостных характеристик применяется расчетная схема в виде стержня. Приведем примеры нескольких частных случаев определения жесткости длинного

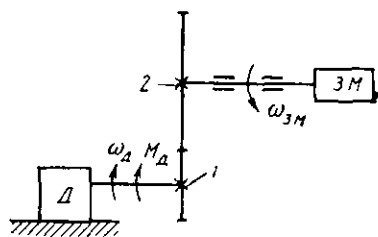


Рис. 10.10. Механизм привода звена манипулятора

стержня одинакового поперечного сечения соответственно для случаев растяжения, изгиба и кручения:

$$c = ES/l; \quad (10.25)$$

$$c = 3EJ_S/l^3; \quad (10.26)$$

$$c = GJ_P/l. \quad (10.27)$$

При записи формул (10.25)–(10.27) введены следующие обозначения: E, G — соответственно модули упругости материала стержня при растяжении и сдвиге; l — длина стержня; S — площадь поперечного сечения стержня; J_S — момент инерции площади сечения относительно нейтральной оси; J_P — полярный момент инерции площади сечения.

Нетрудно убедиться на конкретных примерах, что продольная жесткость стержня (10.25) существенно превышает поперечную (10.26), а жесткость при кручении и изгибе непосредственно зависит от формы поперечного сечения стержня.

Коэффициенты жесткости элементов соединений и кинематических пар определяют при учете контактной деформации. Для упрощения расчетной схемы манипуляторов при исследовании его динамических свойств заменяют несколько упругих элементов одним упругим элементом с приведенным коэффициентом жесткости.

Значения приведенных коэффициентов жесткости определяют из условия равенства потенциальной энергии реальной и расчетной схемы:

$$П = П_{пр}. \quad (10.28)$$

Потенциальную энергию упругих элементов определяют при учете принятой расчетной схемы и вида деформации. Например, для упругих стержней потенциальная энергия деформации численно равна половине произведения силы P или момента пары M на перемещение по ее направлению или угол поворота того сечения, где эта сила или пара приложена, так:

— при линейной деформации стержня

$$П = 0,5P\Delta = 0,5c\Delta^2, \quad (10.29)$$

при угловой деформации

$$П = 0,5M\varphi = 0,5c\varphi^2, \quad (10.30)$$

где Δ и φ соответственно линейное или угловое упругое перемещения.

В качестве примеров определения приведенного коэффициента жесткости $c_{пр}$ рассмотрим параллельное (рис. 10.11, а) и последовательное (рис. 10.11, б) соединение упругих элементов с коэффициентами жесткости c_i ($i = 1, 2, \dots, n$) при растяжении (сжатии).

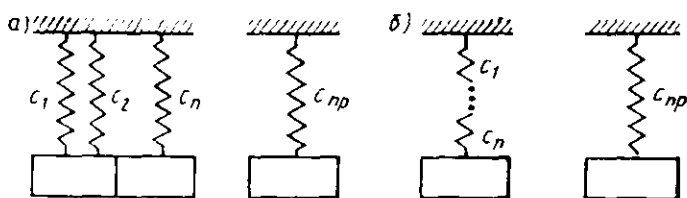


Рис. 10.11. Параллельное (а) и последовательное (б) соединение упругих элементов

При параллельном соединении упругих элементов потенциальная энергия реальной механической системы определится согласно (10.29) соотношением:

$$П = 0,5 (c_1 \Delta_1^2 + c_2 \Delta_2^2 + \dots + c_n \Delta_n^2),$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n = \Delta$ — упругие перемещения элементов системы.

Потенциальная энергия упругого элемента с приведенной жесткостью

$$П_{пр} = 0,5 c_{пр} \Delta^2.$$

Таким образом, из условия равенства $П = П_{пр}$ (10.28) следует, что приведенный коэффициент жесткости

$$c_{пр} = c_1 + c_2 + \dots + c_n.$$

Путем аналогичных рассуждений определяют приведенный коэффициент жесткости в случае последовательного соединения упругих элементов (рис. 10.11, б), а именно:

$$1/c_{пр} = 1/c_1 + 1/c_2 + \dots + 1/c_n.$$

Для упрощения расчетной механической схемы привода звена манипулятора часто бывает целесообразным привести коэффициент жесткости одного вала к жесткости другого. Проиллюстрируем на примере привода, изображенного на рис. 10.12, определение приведенного коэффициента жесткости первого вала к выходному. Пусть закреплен двигатель D , а в k выходному валу 1 , связанному со звеном манипулятора (З.М) и зубчатым колесом 2 , приложен момент M . В результате в реальной механической системе первый и выходной валы получают угловые упругие перемещения, равные соответственно φ_1 и φ_2 (рис. 10.12, а). В приведенной механической системе выходной вал получит угловое упругое перемещение $\varphi_{пр}$ (рис. 10.12, б). Потенциальная энергия реального механизма определится по формуле (10.30)

$$П = 0,5 M_1 \varphi_1,$$

где M_1 — момент M , приведенный к валу двигателя.

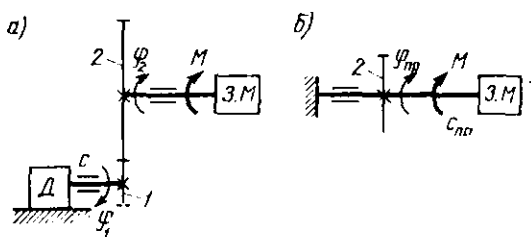


Рис. 10.12. Исходная (а) и приведенная (б) механические системы для определения приведенного коэффициента жесткости

Аналогично тому как была получена формула (10.24), можно найти

$$M_1 = M/i_{12}.$$

Если учесть, что $\varphi_1 = M_1/c$, то потенциальную энергию реального механизма можно представить в виде

$$\Pi = 0,5M^2/i_{12}^2 c. \quad (10.31)$$

Потенциальная энергия расчетной механической модели (рис. 10.12, б)

$$\Pi_{пр} = 0,5M\varphi_{пр}.$$

Учитывая, что $\varphi_{пр} = M/c_{пр}$, получим

$$\Pi_{пр} = 0,5M^2/c_{пр}. \quad (10.32)$$

Значение приведенного коэффициента жесткости определяется из условия равенства потенциальных энергий реальной и приведенной механической системы, определяемых соответственно соотношениями (10.31) и (10.32) $c_{пр} = i_{12}^2 c$.

Матричный метод математического описания динамической модели манипулятора в форме уравнений Лагранжа II рода. Для математического описания приведенных выше механических расчетных моделей манипуляторов промышленных роботов используют различные методы, в том числе второй закон Ньютона, принцип Даламбера, принцип наименьшего принуждения Гаусса уравнения Лагранжа II рода [21; 22]. Среди них наиболее эффективными и наиболее часто применяемыми являются методы, использующие уравнения Лагранжа II рода.

Исполнительные органы роботов, как правило, представляют собой сложные пространственные механизмы со многими степенями свободы, описываемые громоздкими уравнениями кинематики и динамики. Моделирование на ЭВМ динамического поведения таких систем - это мощное средство выявления рациональной кинематической схемы механизма и эффективных алгоритмов управления. Часто только таким образом можно получить ответы на вопросы, возникающие на этапах

предварительного проектирования, разработки, испытания роботов, а также в процессе их эксплуатации.

Для решения этих вопросов в ряде работ [22] предложены методы математического моделирования динамики роботов, которые ориентированы на использование ЭВМ. Так, например, отличительная черта метода, основанного на принципе Гаусса заключается в возможности получать текущие значения обобщенных координат, скоростей и ускорений, минуя вывод уравнений динамики в явном виде. Весьма удобно для моделирования динамики роботов на ЭВМ использование матриц преобразования $[B_i]$ при получении дифференциальных уравнений движения в форме уравнений Лагранжа II рода

Уравнения Лагранжа II рода, с помощью которых можно описать динамику любой голономной системы с n степенями свободы, имеют вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (10.33)$$

где T — кинетическая энергия системы; q_k — обобщенные координаты; $\dot{q}_k$ — обобщенные скорости; Q_k — обобщенные силы.

Кинетическая энергия манипулятора равна сумме кинетических энергий его звеньев и объекта манипулирования

$$T = \sum_{i=1}^n T_i + T_r,$$

где T_i — кинетическая энергия i -го звена; T_r — кинетическая энергия объекта манипулирования. Нетрудно показать [1], что с помощью матриц преобразования $[B_i]$ кинетическая энергия i -го звена может быть представлена в виде

$$T_i = 0,5 \operatorname{tr} ([B_i] [H_i] [\dot{B}_i]^*), \quad (10.34)$$

где $[B_i]$ — матрица, состоящая из первых производных по времени элементов матрицы $[B_i]$; $[\dot{B}_i]^*$ — транспонированная матрица $[\dot{B}_i]$; $[H_i]$ — матрица инерции i -го звена. Матрицы инерции $[H_i]$ имеют следующую структуру:

$$[H_i] = \begin{bmatrix} J_{x_i x_i}^{(i)} & J_{x_i y_i}^{(i)} & J_{x_i z_i}^{(i)} & S_{x_i}^{(i)} \\ J_{y_i x_i}^{(i)} & J_{y_i y_i}^{(i)} & J_{y_i z_i}^{(i)} & S_{y_i}^{(i)} \\ J_{z_i x_i}^{(i)} & J_{z_i y_i}^{(i)} & J_{z_i z_i}^{(i)} & S_{z_i}^{(i)} \\ S_{x_i} & S_{y_i} & S_{z_i} & m_i \end{bmatrix}, \quad (10.35)$$

где величины

$$J_{x_i x_i}^{(i)} = \int x_i^2 dm_i; \quad J_{y_i y_i}^{(i)} = \int y_i^2 dm_i; \quad J_{z_i z_i}^{(i)} = \int z_i^2 dm_i$$

суть моменты инерции i -го звена манипулятора относительно координатных плоскостей системы отсчета, неразрывно связанной с этим звеном:

$$J_{x_i y_i}^{(i)} = J_{y_i x_i}^{(i)} = \int x_i y_i dm_i; \quad J_{x_i z_i}^{(i)} = J_{z_i x_i}^{(i)} = \int x_i z_i dm_i;$$

$$J_{y_i z_i}^{(i)} = J_{z_i y_i}^{(i)} = \int y_i z_i dm_i$$

суть центробежные моменты инерции; m_i — масса i -го звена;

$$S_{x_i}^{(i)} = \int x_i dm_i; \quad S_{y_i}^{(i)} = \int y_i dm_i; \quad S_{z_i}^{(i)} = \int z_i dm_i$$

суть статические моменты.

Следует заметить, что для систем координат, связанных со звеньями, матрицы $[H_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) могут иметь совершенно произвольный вид, за исключением того, что они симметричные.

Если в качестве связанных со звеньями систем координат выбрать системы координат, оси которых являются главными осями инерции звеньев, то центробежные моменты инерции будут равны нулю. Очевидно, что матрица инерции (10.35) от характера движения звена не зависит и несет в себе всю необходимую информацию о распределении масс в твердом теле относительно связанной с ним системы координат.

Таким образом, согласно (10.34), кинетическая энергия i -го звена манипулятора равна половине суммы диагональных элементов квадратной матрицы 4×4 , полученной в результате перемножения трех матриц: $[B_i]$, $[H_i]$ и $[B_i]^*$ ($\text{tr}[C]$ — след матрицы — линейная операция, вычисляющая сумму диагональных элементов квадратной матрицы, т. е. $\text{tr}[C] = \sum C_{ii}$).

Уравнения Лагранжа II рода (10.33) с учетом (10.34) могут быть приведены к следующему виду [21]:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k,j=1}^i \text{tr}[B_i^{(j)} H_i B_i^{(k)*}] \ddot{q}_j + \sum_{i=1}^n \sum_{k,j=1}^i \text{tr}[B_i^{(j)} H_i B_i^{(k)*}] \times \\ \times \dot{q}_j \dot{q}_i = Q_k \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (10.36)$$

где матрицы $[B_i^{(j)}]$ и $[B_i^{(j)*}]$ определены следующими формулами:

$$[B_i^{(j)}] = \begin{cases} [A_1] \dots [A_{j-1}] [D_j] [A_j] [A_{j+1}] \dots [A_i], & \text{если } j \leq i; \\ 0, & \text{если } j > i; \end{cases}$$

$$[B_i^{(k)*}] = \begin{cases} [A_i] \dots [A_{j-1}] [D_j] [A_j] \dots [A_{k-1}] [D_k] [A_k] \dots [A_i], & \text{если } j < k \leq i; \\ [A_i] \dots [A_{j-1}] [D_j]^2 [A_j] \dots [A_i], & \text{если } j = k \leq i; \\ 0, & \text{если } j > i \text{ и } k > i. \end{cases}$$

Здесь $[A_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) — матрицы преобразования систем координат, связанных со звеньями (10.6); матрицы $[D_j]$ имеют следующую структуру:

$$[D_j] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ если сочленение вращательное;}$$

$$[D_j] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ если сочленение телескопическое.}$$

В правых частях уравнений Лагранжа (10.36) стоят обобщенные силы, соответствующие выбранным обобщенным координатам. Обобщенные силы для механизмов манипуляторов можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$Q_k = Q_{qk} + Q_{bk} \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (10.37)$$

Если за обобщенные координаты выбраны параметры, определяющие относительное перемещение двух соединенных звеньев, то первое слагаемое в (10.37) Q_{bk} будет моментом либо усилием, развиваемым k -м приводом, приведенным к оси кинематической пары. Второе слагаемое в (10.37) Q_{bk} представляет собой обобщенную силу, соответствующую всем остальным активным силам, к которым относят силы тяжести, полезного сопротивления и т. д.

Обобщенную силу Q_{bk} , отнесенную к k -й обобщенной координате, определяют по известным методам теоретической механики.

Пусть на механическую систему действует n активных сил $\overline{F}_1, \overline{F}_2, \dots, \overline{F}_n$; положение точек приложения сил в инерциальной системе координат определяется радиусами-векторами $\overline{r}_i = \overline{r}_i(x_i, y_i, z_i)$. Тогда обобщенная сила Q_{bk} , отнесенная к k -й обобщенной координате, определится соотношением:

$$Q_{bk} = \sum_{i=1}^n \overline{F}_i \frac{\partial \overline{r}_i}{\partial q_k}$$

или

$$Q_{bk} = \sum_{i=1}^n \left[F_{ix} \frac{\partial x_i}{\partial q_k} + F_{iy} \frac{\partial y_i}{\partial q_k} + F_{iz} \frac{\partial z_i}{\partial q_k} \right]. \quad (10.38)$$

Для манипуляторов обобщенные силы имеют следующий механический смысл [22]: в случае поступательной кинематической пары Q_k — это сумма проекций на k -ю кинематическую ось активных сил, действующ-

щих на звенья с номерами $k, k + 1, \dots, n$; в случае вращательной пары это сумма моментов относительно кинематической оси активных сил, приложенных к звеньям с номерами $k, k + 1, \dots, n$.

Использование рекуррентных соотношений при получении уравнений Лагранжа II рода. Следует заметить, что уравнения Лагранжа II рода в форме (10.36), когда коэффициенты уравнений выражены с помощью произведения матриц, удобны для их решения на ЭВМ. Если же необходимо получить дифференциальные уравнения движения, в которых коэффициенты представлены явно в виде некоторых функций, то переход к таким уравнениям непосредственно от (10.36) весьма трудоемок. Это особенно относится к промышленным роботам со многими степенями свободы, поэтому целесообразно дать такой метод получения дифференциальных уравнений движения в аналитической форме, который был бы по возможности менее трудоемким и, что очень важно, — формализованным, обеспечивающим наименьшую вероятность ошибки в записи переменных, необходимых для составления уравнений. Эффективность использования того или иного способа решения задач динамики промышленного робота в каждом конкретном случае должна быть определена путем специальных исследований, учитывающих особенности постановки задачи и условий ее решения.

Перейдем к описанию метода получения уравнений динамики сложных исполнительных механизмов в аналитической форме, который удовлетворяет выше сформулированным требованиям. При составлении уравнений движения механической системы в форме уравнений Лагранжа II рода наиболее трудоемко определение кинетической энергии системы.

Кинетическую энергию i -го звена манипулятора в общем случае его движения представим в виде

$$T_i = 0,5 m_i \bar{v}_{p_i}^2 + m_i \bar{v}_{p_i} \bar{v}_{c_i}^{(r)} + T_i^{(r)}, \quad (10.39)$$

где m_i — масса i -го звена; $\bar{v}_{p_i}$ — скорость начала координат связанной с i -м звеном системы координат; $\bar{v}_{c_i}^{(r)}$ — скорость центра масс i -го звена по отношению к поступательно движущейся системе координат с началом в точке p_i ; $T_i^{(r)}$ — кинетическая энергия системы в ее относительном движении по отношению к поступательно движущейся системе отсчета с началом в точке p_i .

Кинетическую энергию системы в ее относительном движении находят по формуле:

$$T_i^{(r)} = 0,5 [J_{x_i}^{(i)} \omega_{x_i}^2 + J_{y_i}^{(i)} \omega_{y_i}^2 + J_{z_i}^{(i)} \omega_{z_i}^2 - 2J_{x_i y_i}^{(i)} \omega_{x_i} \omega_{y_i} - 2J_{y_i z_i}^{(i)} \omega_{y_i} \omega_{z_i} - 2J_{x_i z_i}^{(i)} \omega_{x_i} \omega_{z_i}], \quad (10.40)$$

где $J_{x_i}^{(i)}, J_{y_i}^{(i)}, J_{z_i}^{(i)}, J_{x_i y_i}^{(i)}, J_{y_i z_i}^{(i)}, J_{x_i z_i}^{(i)}$ —

соответственно три момента инерции относительно осей координат,

связанных с i -м звеном, и три центробежных момента инерции в этой же связанной системе координат; ω_{x_i} , ω_{y_i} , ω_{z_i} —

проекции абсолютной угловой скорости i -го звена (т. е. угловой скорости i -го звена относительно инерциальной системы отсчета $\omega^{(i)}$) на оси координат, связанных с этим звеном.

Движение i -го звена манипулятора по отношению к инерциальной системе отсчета может быть рассмотрено как составное, в котором переносным является поступательное движение вместе с некоторым полюсом, например, началом связанной системы координат p_i , а относительным — вращательное движение вокруг некоторой оси, проходящей через этот полюс.

Таким образом, относительная скорость центра масс i -го звена может быть определена по формуле Эйлера:

$$\vec{v}_{c_i}^{(r)} = \vec{\omega}^{(i)} \times \vec{p_i c_i}, \quad (10.41)$$

где $\vec{p_i c_i}$ — радиус-вектор центра масс i -го звена относительно начала связанной с ним системы координат. По (10.41) не представляет труда определить проекции скорости $\vec{v}_{c_i}^{(r)}$ на оси связанной со звеном системы координат:

$$\begin{aligned} \vec{v}_{c_i}^{(r)} = & \{ (\omega_{y_i} (\vec{p_i c_i})_{z_i} - \omega_{z_i} (\vec{p_i c_i})_{y_i}; \\ & \omega_{z_i} (\vec{p_i c_i})_{x_i} - \omega_{x_i} (\vec{p_i c_i})_{z_i}; \\ & (\omega_{x_i} (\vec{p_i c_i})_{y_i} - \omega_{y_i} (\vec{p_i c_i})_{x_i}) \}^* \quad (i = 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \quad (10.42)$$

Здесь $(\vec{p_i c_i})_{x_i}$, $(\vec{p_i c_i})_{y_i}$, $(\vec{p_i c_i})_{z_i}$ — проекции радиус-вектора $\vec{p_i c_i}$ на оси связанной с i -м звеном системы координат, равные координатам $x_{c_i}^{(i)}$, $y_{c_i}^{(i)}$, $z_{c_i}^{(i)}$ центра масс i -го звена в связанной с ним системе координат; ω_{x_i} , ω_{y_i} , ω_{z_i} — проекции абсолютной угловой скорости i -го звена на оси связанной с ним системы координат (это объясняется тем, что угловые скорости звена относительно инерциальной системы координат и относительно поступательно движущейся в ней системы координат будут равны).

Таким образом, (10.42) можно представить в виде

$$\vec{v}_{c_i}^{(r)} = \{ (\omega_{y_i} z_{c_i}^{(i)} - \omega_{z_i} y_{c_i}^{(i)}), (\omega_{z_i} x_{c_i}^{(i)} - \omega_{x_i} z_{c_i}^{(i)}), (\omega_{x_i} y_{c_i}^{(i)} - \omega_{y_i} x_{c_i}^{(i)}) \} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (10.43)$$

Выражение кинетической энергии звена манипулятора, полученное на основании (10.39), имеет наиболее простой вид в том случае, когда начало связанной с i -м звеном системы координат — точка p_i вы-

брана на оси сочленения $(i - 1)$ -го и i -го звеньев. Это особенно относится к промышленным роботам, имеющим несколько вращательных сочленений. Таким образом, в дальнейшем будем выбирать начало координат связанной с i -м звеном системы на оси сочленения, соединяющего $(i - 1)$ -е и i -е звенья.

Проведем рассуждения, которые позволят получить рекуррентные соотношения, определяющие проекции векторов скоростей начал, связанных со звеньями систем координат на оси координат этих систем.

Рассмотрим движение точки p_i как сложное, в котором переносным является поступательное движение вместе с полюсом p_{i-1} — началом системы координат, связанной с предыдущим звеном. Тогда относительная скорость точки p_i определится соотношением

$$\vec{v}_{p_i}^{(r)} = \vec{v}_{p_i}^{(n)} + \vec{\omega}^{(i-1)} \times \overrightarrow{p_{i-1}p_i}, \quad (10.44)$$

где $\overrightarrow{p_{i-1}p_i}$ — радиус-вектор точки p_i относительно p_{i-1} ;

$$\vec{v}_{p_i}^{(n)} = \begin{cases} \text{скорости поступательного перемещения} \\ i\text{-го звена относительно } (i-1)\text{-го, если} \\ \text{сочленение телескопическое;} \\ 0, \text{ если сочленение вращательное.} \end{cases} \quad (10.45)$$

Абсолютная скорость точки p_i

$$\vec{v}_{p_i} = \vec{v}_{p_{i-1}} + \vec{v}_{p_i}^{(n)} + \vec{\omega}^{(i-1)} \times \overrightarrow{p_{i-1}p_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (10.46)$$

Учитывая (10.46), скорость точки p_i в проекциях на оси связанной с i -м звеном системы координат можно представить в виде следующего рекуррентного соотношения:

$$\begin{Bmatrix} v_{p_i x_i} \\ v_{p_i y_i} \\ v_{p_i z_i} \end{Bmatrix} = [e_i^*] \begin{Bmatrix} v_{p_{i-1} x_{i-1}} \\ v_{p_{i-1} y_{i-1}} \\ v_{p_{i-1} z_{i-1}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} v_{p_i}^{(n)} x_i \\ v_{p_i}^{(n)} y_i \\ v_{p_i}^{(n)} z_i \end{Bmatrix} + \\ + [e_i^*] \begin{Bmatrix} \omega_{x_{i-1}}^{(i-1)} (\overrightarrow{p_{i-1}p_i})_{z_{i-1}} - \omega_{z_{i-1}}^{(i-1)} (\overrightarrow{p_{i-1}p_i})_{y_{i-1}} \\ \omega_{z_{i-1}}^{(i-1)} (\overrightarrow{p_{i-1}p_i})_{x_{i-1}} - \omega_{x_{i-1}}^{(i-1)} (\overrightarrow{p_{i-1}p_i})_{z_{i-1}} \\ \omega_{x_{i-1}}^{(i-1)} (\overrightarrow{p_{i-1}p_i})_{y_{i-1}} - \omega_{y_{i-1}}^{(i-1)} (\overrightarrow{p_{i-1}p_i})_{x_{i-1}} \end{Bmatrix}, \quad (10.47)$$

где $v_{p_i x_i}$, $v_{p_i y_i}$, $v_{p_i z_i}$ — проекции скорости начала системы координат, связанной с i -м звеном, на оси этой системы; $v_{p_{i-1} x_{i-1}}$, $v_{p_{i-1} y_{i-1}}$, $v_{p_{i-1} z_{i-1}}$ — проекции скорости начала системы координат, связанной с $(i - 1)$ -м звеном, на оси этой системы; $v_{p_i}^{(n)} x_i$, $v_{p_i}^{(n)} y_i$, $v_{p_i}^{(n)} z_i$ — проекции ско-

рости, определяемой по (10.45) на оси системы координат, связанной с i -м звеном; $[e_i^*] = [e^{-1}]^T$ — транспонированная матрица направляющих косинусов; $(\vec{p}_{i-1} p_i)_{x_{i-1}}$, $(\vec{p}_{i-1} p_i)_{y_{i-1}}$, $(\vec{p}_{i-1} p_i)_{z_{i-1}}$ — проекции вектора $\vec{p}_{i-1} p_i$ на оси системы координат, связанной с $(i-1)$ -м звеном. Применяя рекуррентное соотношение (10.47), следует учитывать, что $\vec{v}_{p_0} = 0$ и $\omega^{(0)} = 0$.

Как следует из соотношений (10.40), (10.43) и (10.47), для определения кинетической энергии манипулятора промышленного робота по формуле (10.39) необходимо знать проекции абсолютной угловой скорости звеньев на оси координат, неразрывно связанными с этими звеньями.

Пусть

$$\vec{\omega}_i^{(i)} = \begin{cases} \text{вектор угловой скорости вращения } i\text{-го} \\ \text{звена относительно } (i-1)\text{-го, если сочлене-} \\ \text{ние вращательное;} \\ 0, \text{ если сочленение телескопическое,} \end{cases} \quad (10.48)$$

а $\vec{\omega}^{(i-1)}$ — абсолютная угловая скорость $(i-1)$ -го звена. Тогда абсолютная угловая скорость i -го звена будет равна

$$\vec{\omega}^{(i)} = \vec{\omega}^{(i-1)} + \vec{\omega}_i^{(i)} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (10.49)$$

Учитывая (10.49), проекции угловой скорости $\vec{\omega}_i^{(i)}$ на оси координат, связанные с i -м звеном, можно определить по следующему рекуррентному соотношению:

$$\{\omega^{(i)}\} = [e_i^*] \{\omega^{(i-1)}\} + \{\omega_i^{(i)}\} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (10.50)$$

В развернутом виде (10.50) запишем следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \omega_x^{(i)} \\ \omega_y^{(i)} \\ \omega_z^{(i)} \end{Bmatrix} = [e_i^*] \begin{Bmatrix} \omega_x^{(i-1)} \\ \omega_y^{(i-1)} \\ \omega_z^{(i-1)} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \omega_{rx}^{(i)} \\ \omega_{ry}^{(i)} \\ \omega_{rz}^{(i)} \end{Bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (10.51)$$

где $\omega_x^{(i-1)}$, $\omega_y^{(i-1)}$, $\omega_z^{(i-1)}$ — проекции абсолютной угловой скорости $(i-1)$ -го звена на оси координат, связанные с этим звеном; $\omega_{rx}^{(i)}$, $\omega_{ry}^{(i)}$, $\omega_{rz}^{(i)}$ — проекции относительной угловой скорости, определяемой соотношением (10.48) на оси координат, связанные с i -м звеном.

Пример составления уравнений Лагранжа II рода манипулятора ПР. Проиллюстрируем изложенный выше способ вычисления кинетической энергии на примере составления уравнений Лагранжа II рода для руки робота (без учета подвижности его рабочего органа), кине-

матическая схема которого изображена на рис. 10.13. Эта кинематическая схема соответствует широко используемым промышленным роботам типа «Контур-002», «Колер» ЛП-30, ПРГ-1 и т. п. Рабочими движениями этого робота с тремя степенями свободы являются: вращение звена 1 вокруг вертикальной оси и вращения звеньев 2 и 3 вокруг горизонтальных осей, параллельных между собой. В качестве обобщенных координат выбираем углы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ относительного поворота звеньев. Будем считать звенья абсолютно твердыми телами. Исходными данными являются: длины звеньев l_i , их

массы m_i и моменты инерции $J_{x_i}^{(i)}, J_{y_i}^{(i)}, J_{z_i}^{(i)}$ относительно осей координат, связанных со звеньями. Кроме того, считаем известным положение центра масс (его координаты в соответствующей связанной системе координат) каждого звена.

Составление уравнений динамики начнем с записи матриц преобразования координат $[A_i]$ ($i = 1, 2, 3$) (10.26). На рис. 10.13, б показаны система координат $p_0x_0y_0z_0$ и системы координат $p_ix_iy_iz_i$ ($i = 1, 2, 3$), связанные с соответствующими звеньями.

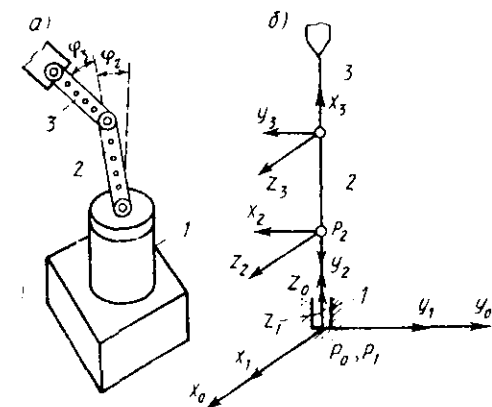


Рис. 10.13. Общий вид (а) и кинематическая схема (б) трехзвенового робота

Система координат $p_0x_0y_0z_0$ связана с неподвижным основанием 0, при этом ось p_0z_0 направлена вдоль оси сочленения основания со звеном 1. Системы отсчета $p_1x_1y_1z_1$ и $p_2x_2y_2z_2$ выбраны следующим образом: оси z_i ($i = 1, 2$) направлены вдоль осей сочленения, соединяющих звенья ($i - 1$)-е и i -е, оси x_i ($i = 1, 2$) — вдоль общего перпендикуляра к осям z_{i-1} и z_i . За положительное направление осей x_i ($i = 1, 2$) выбраны направления векторов $\bar{z}_i \times \bar{z}_{i-1}$. Оси координат y_i ($i = 1, 2$) выбраны таким образом, чтобы у систем координат была правая ориентация.

Как видно из рис. 10.13, б, начала связанных со звеньями систем координат выбраны на осях сочленения, соединяющих ($i - 1$)-е и i -е звенья, в данном случае — на осях собственных вращений звеньев.

Матрицы преобразования координат $[A_i]$ имеют структуру (10.27), где векторы $\bar{p}_i$ ($i = 1, 2, 3$) — начал связанных систем координат:

$$\bar{p}_1 = (0, 0, 0)^*, \quad \bar{p}_2 = (0, 0, l_1)^*, \quad \bar{p}_3 = (0, l_2, 0)^*,$$

и матрицы направляющих косинусов:

$$\{e_1\} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (10.52)$$

$$\{e_2\} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 & 0 \\ -\sin \varphi_2 & -\cos \varphi_2 & 0 \end{bmatrix}; \quad (10.53)$$

$$\{e_3\} = \begin{bmatrix} \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & 0 \\ -\cos \varphi_3 & \sin \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (10.54)$$

На основании (10.52)–(10.54) не представляет труда записать транспонированные матрицы направляющих косинусов:

$$\{e_1^*\} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (10.55)$$

$$\{e_2^*\} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 \\ 0 & \sin \varphi_2 & -\cos \varphi_2 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (10.56)$$

$$\{e_3^*\} = \begin{bmatrix} \sin \varphi_3 & -\cos \varphi_3 & 0 \\ \cos \varphi_3 & \sin \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10.57)$$

Выбранные положительные направления отсчета углов поворота одного звена по отношению к предыдущему и выбранные связанные со звеньями системы координат (10.13, б) позволяют легко найти проекции относительных угловых скоростей звеньев $\omega_r^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$) на связанные с ними оси:

$$\{\omega_r^{(1)}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_1 \end{Bmatrix}; \quad \{\omega_r^{(2)}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_2 \end{Bmatrix}; \quad \{\omega_r^{(3)}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_3 \end{Bmatrix}. \quad (10.58)$$

На основании рекуррентного соотношения (10.51) определим проекции абсолютных угловых скоростей звеньев на связанные с ними оси координат. Так как угловая скорость 0-го звена $\omega_0 = 0$, то, согласно (10.49),

$$\{\omega_r^{(1)}\} = \omega_r^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_1 \end{Bmatrix}; \quad (10.59)$$

$$\{\omega^{(2)}\} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \\ 0 & \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_1 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\dot{\varphi}_1 \sin \varphi_2 \\ -\dot{\varphi}_1 \cos \varphi_2 \\ \dot{\varphi}_2 \end{Bmatrix}; \quad (10.60)$$

$$\{\omega^{(3)}\} = \begin{bmatrix} \sin \varphi_3 & -\cos \varphi_3 & 0 \\ \cos \varphi_3 & \sin \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_2 \\ \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_2 \\ \dot{\varphi}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\varphi}_1 \cos (\varphi_2 + \varphi_3) \\ -\dot{\varphi}_1 \sin (\varphi_2 + \varphi_3) \\ \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3 \end{Bmatrix}. \quad (10.61)$$

Найденные выше проекции векторов угловой скорости звеньев на связанные со звеньями оси координат (10.59) - (10.61) позволяют на основании соотношения (10.43) определить проекции на эти же оси относительных скоростей $v_{c_i}^{(r)}$ ($i = 1, 2, 3$) центров масс звеньев:

$$\{v_{c_1}^{(r)}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \{v_{c_2}^{(r)}\} = \begin{Bmatrix} -\dot{\varphi}_2 \cdot y_{c_1} \\ 0 \\ -\dot{\varphi}_1 \sin \varphi_2 \cdot y_{c_1} \end{Bmatrix}; \quad \{v_{c_3}^{(r)}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \cdot x_{c_1} \\ \dot{\varphi}_1 \sin (\varphi_2 + \varphi_3) x_{c_1} \end{Bmatrix}. \quad (10.62)$$

При получении соотношений (10.62) было сделано предположение, что звенья манипулятора обладают осевой симметрией и поэтому (рис. 10.13, б)

$$x_{c_1} = y_{c_1}, \quad x_{c_2} = z_{c_1} = z_{c_2} = -y_{c_1} = 0.$$

Рекуррентные соотношения (10.44) и (10.56) - (10.61) позволяют определить проекции скоростей начал, связанных со звеньями систем координат на оси этих систем:

$$\{v_{p_1}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \{v_{p_2}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \{v_{p_3}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\varphi}_2 l_2 \sin \varphi_3 \\ \dot{\varphi}_2 l_2 \cos \varphi_3 \\ \dot{\varphi}_1 l_2 \sin \varphi_2 \end{Bmatrix}. \quad (10.63)$$

На основании (10.39), учитывая (10.40), (10.59) - (10.63), можно определить кинетическую энергию каждого из звеньев манипулятора:

$$T_1 = 0,5 J_{z_1}^{(1)} \dot{\varphi}_1^2; \quad (10.64)$$

$$T_2 = 0,5 J_{x_2}^{(2)} \dot{\varphi}_1^2 \sin^2 \varphi_2 + 0,5 J_{y_2}^{(2)} \dot{\varphi}_1^2 \cos^2 \varphi_2 + 0,5 J_{z_2}^{(2)} \dot{\varphi}_2^2; \quad (10.65)$$

$$T_3 = 0,5 m_3 [\dot{\varphi}_2^2 l_2^2 + \dot{\varphi}_1^2 l_2^2 \sin^2 \varphi_2 + 2 \dot{\varphi}_2 (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) l_2 x_{c_3} \cos \varphi_3 + \\ + 2 \dot{\varphi}_1^2 l_2 x_{c_3} \sin \varphi_2 \sin (\varphi_2 + \varphi_3) + 0,5 [J_{x_3}^{(3)} \dot{\varphi}_1^2 \cos^2 (\varphi_2 + \varphi_3) + \\ + J_{y_3}^{(3)} \dot{\varphi}_1^2 \sin^2 (\varphi_2 + \varphi_3) + J_{z_3}^{(3)} (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3)^2], \quad (10.66)$$

где m_3 - суммарная масса третьего звена манипулятора и переносимого груза.

Выражения (10.64) - (10.66) были получены с учетом предположения, что оси координат, связанные со звеньями манипулятора, являются главными осями инерции (т. е. соответствующие центробежные моменты инерции равны нулю).

Кинетическая энергия всего манипулятора определится по формуле

$$T = T_1 + T_2 + T_3. \quad (10.67)$$

Для упрощения дальнейших преобразований представим кинетическую энергию манипулятора (10.67) в виде

$$T = 0,5 [a_{11} \dot{\varphi}_1^2 + a_{22} \dot{\varphi}_2^2 + a_{33} \dot{\varphi}_3^2 + a_{23} \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3], \quad (10.68)$$

где

$$a_{11} = J_{z_1}^{(1)} + J_{x_2}^{(2)} \sin^2 \varphi_2 + J_{y_2}^{(2)} \cos^2 \varphi_2 + J_{x_3}^{(3)} \cos^2 (\varphi_2 + \varphi_3) + \\ + J_{y_3}^{(3)} \sin^2 (\varphi_2 + \varphi_3) + m_3 [l_2^2 \sin^2 \varphi_2 + 2 l_2 x_{c_3} \sin \varphi_2 \sin (\varphi_2 + \varphi_3)]; \\ a_{22} = J_{z_2}^{(2)} + J_{z_3}^{(3)} + m_3 [l_2^2 + 2 l_2 x_{c_3} \cos \varphi_3]; \\ a_{33} = J_{z_3}^{(3)}; \\ a_{23} = 2 J_{z_3}^{(3)} + 2 m_3 l_2 x_{c_3} \cos \varphi_3. \quad (10.69)$$

Уравнения Лагранжа II рода (10.33) для рассматриваемого примера имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = Q_1; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = Q_2; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_3} = Q_3. \quad (10.70)$$

Как следует из (10.70), для получения уравнений движения манипулятора необходимо найти требуемые производные от функции, определяющей его кинетическую энергию (10.68), (10.69), а также необходимо определить обобщенные силы системы Q_i ($i = 1, 2, 3$), соот-

ветствующие выбранным обобщенным координатам. Обобщенные силы можно представить в виде суммы двух слагаемых (10.37).

Так как за обобщенные координаты выбраны углы относительного поворота звеньев, то первые слагаемые в (10.37) будут равны моментам приводов, приведенным к соответствующим осям кинематических пар:

$$Q_{\alpha k} = M_{\alpha k} \quad (k = 1, 2, 3). \quad (10.71)$$

Вторые слагаемые в (10.37) представляют собой обобщенные силы, соответствующие всем остальным активным силам, действующим на манипулятор. Для иллюстрации определения этих обобщенных сил рассмотрим случай, когда на манипулятор кроме моментов приводов действуют лишь силы тяжести его звеньев. Тогда, согласно (10.38),

$$\begin{aligned} Q_{q1} &= -m_1 g \frac{\partial z_{c1}}{\partial q_1} - m_2 g \frac{\partial z_{c2}}{\partial q_1} - m_3 g \frac{\partial z_{c3}}{\partial q_1}; \\ Q_{q2} &= -m_1 g \frac{\partial z_{c1}}{\partial q_2} - m_2 g \frac{\partial z_{c2}}{\partial q_2} - m_3 g \frac{\partial z_{c3}}{\partial q_2}; \\ Q_{q3} &= -m_1 g \frac{\partial z_{c1}}{\partial q_3} - m_2 g \frac{\partial z_{c2}}{\partial q_3} - m_3 g \frac{\partial z_{c3}}{\partial q_3}, \end{aligned} \quad (10.72)$$

где g — ускорение свободного падения; z_{c1} , z_{c2} , z_{c3} — соответственно координаты z центров масс звеньев в инерционной системе отсчета, которые могут быть определены с помощью (10.9), а именно:

$$\{r_{c1}\} = [A_1] \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{c1} \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{c1} \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (10.73)$$

где $z_{c1} = \text{const}$.

$$\{r_{c2}\} = [A_1][A_2] \begin{Bmatrix} 0 \\ y_{c2} \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -y_{c2}^{(2)} \sin \varphi_2 \sin \varphi_1 \\ y_{c2}^{(2)} \sin \varphi_2 \cos \varphi_1 \\ -y_{c2} \cos \varphi_2 \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (10.74)$$

$$\begin{aligned} \{r_{c3}\} &= [A_1][A_2][A_3] \begin{Bmatrix} x_{c3}^{(3)} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} = \\ &= \begin{Bmatrix} x_{c3}^{(3)} \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ -x_{c3}^{(3)} \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \cos \varphi_1 - l_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ x_{c3}^{(3)} \cos(\varphi_2 + \varphi_3) + l_2 \cos \varphi_2 \\ 1 \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (10.75)$$

Таким образом, соотношения (10.72) с учетом (10.73) — (10.75) примут вид:

$$\begin{aligned} Q_{B_1} &= 0; \\ Q_{B_2} &= -m_2 g y_{c_2}^{(3)} \sin \varphi_2 + m_3 g x_{c_3}^{(3)} \sin (\varphi_2 + \varphi_3) + m_3 g l_2 \sin \varphi_2; \\ Q_{B_3} &= m_3 g x_{c_3}^{(3)} \sin (\varphi_2 + \varphi_3). \end{aligned} \quad (10.76)$$

Нетрудно убедиться в том, что обобщенные силы, отнесенные к q_k ($k = 1, 2, 3$) обобщенной координате, равны в рассматриваемом случае сумме моментов сил тяжести звеньев с номерами $k, k+1, \dots, n$ относительно k -й кинематической оси.

Уравнения (10.70) с учетом (10.71), (10.76) и найденных производных от функции (10.68) представим следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{11} \ddot{\varphi}_1 + b_{12} \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + b_{13} \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 &= M_{d1}; \\ a_{22} \ddot{\varphi}_2 + 0,5 a_{23} \ddot{\varphi}_3 + b_{23} \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 + b_{33} \dot{\varphi}_3^2 + b_{11} \dot{\varphi}_1^2 &= M_{d2} + c_{22}; \\ a_{33} \ddot{\varphi}_3 + 0,5 a_{23} \ddot{\varphi}_2 + 0,5 b_{23} \dot{\varphi}_2^2 + b_{34} \dot{\varphi}_1^2 &= M_{d3} + c_{33}, \end{aligned} \quad (10.77)$$

где $a_{11}, a_{22}, a_{23}, a_{33}$ определяются соотношениями (10.69),

$$\begin{aligned} b_{12} &= (J_{x_1}^{(2)} - J_{y_1}^{(2)}) \sin 2\varphi_2 + (J_{y_3}^{(3)} - J_{x_3}^{(3)}) \sin 2(\varphi_2 + \varphi_3) + m_3 l_2^2 \sin 2\varphi_2 + \\ &+ 2m_3 l_2 x_{c_3} \sin 2(\varphi_2 + \varphi_3); \\ b_{13} &= (J_{y_3}^{(3)} - J_{x_3}^{(3)}) \sin 2(\varphi_2 + \varphi_3) + 2m_3 l_2 x_{c_3} \sin \varphi_3 \cos (\varphi_2 + \varphi_3); \\ b_{23} &= 2m_3 l_2 x_{c_3} \sin \varphi_3; \\ b_{33} &= m_3 l_2 x_{c_3} \sin \varphi_3; \\ b_{11} &= 0,5 (J_{x_1}^{(2)} - J_{y_1}^{(2)}) \sin 2\varphi_2 + 0,5 (J_{y_3}^{(3)} - J_{x_3}^{(3)}) \sin 2(\varphi_2 + \varphi_3) - \\ &- m_3 [0,5 l_2^2 \sin 2\varphi_2 + l_2 x_{c_3} \sin (2\varphi_2 + \varphi_3)]; \\ b_{34} &= 0,5 (J_{y_3}^{(3)} - J_{x_3}^{(3)}) \sin 2(\varphi_2 + \varphi_3) - m_3 l_2 x_{c_3} \sin \varphi_2 \cos (\varphi_2 + \varphi_3); \\ c_{22} &= -m_2 g y_{c_2}^{(2)} \sin \varphi_2 + m_3 g x_{c_3}^{(3)} \sin (\varphi_2 + \varphi_3) + m_3 g l_2 \sin \varphi_2; \\ c_{33} &= m_3 g x_{c_3}^{(3)} \sin (\varphi_2 + \varphi_3). \end{aligned}$$

Таким образом, движение механической системы, рассмотренной в виде динамической модели исполнительного органа промышленного робота, описывается системой трех дифференциальных уравнений. Они являются математической моделью механизма.

Следует сделать некоторые выводы, относящиеся к изложенному и проиллюстрированному на примере методу получения уравнений динамики исполнительного органа промышленного робота. Метод основан на использовании матриц преобразования координат (10.6) и рекуррентных соотношений (10.43), (10.47), (10.51), позволяющих определять проекции скорости центра масс, центра кинематической пары, а также угловой скорости каждого звена манипулятора на оси

координат, связанные с этим звеном. Этот метод достаточно формализован, что существенно снижает вероятность появления ошибок при записи уравнений. Кроме того, при определении кинетической энергии звеньев по формуле (10.39) за полюс (точку p_i ($i = 1, 2, 3$)) (рис. 10.13, б) выбирался не центр масс звена (как, обычно), а точка, расположенная на оси сочленения данного звена с предыдущим (т. е. на оси собственного вращения звена). Как показали практические расчеты, это приводит к существенному упрощению выражения кинетической энергии и поэтому к заметному сокращению объема математических преобразований при получении левых частей уравнений (10.33).

Рис. 10.14. Схема редуктора привода

звеньям. В этом случае нужно в кинетическую энергию системы включить кинетическую энергию передаточных механизмов.

$$T = T_c + \bar{v}_0 \bar{Q}_r + \bar{\omega}_l + \bar{K}_r^0 + T_r, \quad (10.78)$$

Кинетическую энергию переносного движения можно учесть при определении кинетической энергии ($i-1$)-го вена, присоединяя к этому звену ротор двигателя, как жестко связанную с ним массу.

Кинетический момент $\bar{K}_r^0$ равен по модулю $J_p q_i i$, где i — передаточное число механизма, связывающего ротор с i -м звеном ($q_i i$ — относительная угловая скорость ротора). Вектор $\bar{K}_r^0$ направлен по оси ротора.

Скалярное произведение двух векторов $\overline{\omega_{i-1}}$ и K_i^n можно представить в виде

$$\overline{\omega_{i-1}} \overline{K_i^n} = (\omega_{i-1,x} l + \omega_{i-1,y} m + \omega_{i-1,z} n) J_p \dot{q}_i \dot{i}, \quad (10.79)$$

где $\omega_{i-1,x}$, $\omega_{i-1,y}$, $\omega_{i-1,z}$ — проекции угловой скорости ω_{i-1} на оси системы координат, связанной с $(i-1)$ -м звеном; l , m , n — направляющие косинусы оси ротора в той же системе координат.

Кинетическую энергию ротора двигателя для его относительного движения определяют по формуле

$$T_r = 0,5 J_p \dot{q}_i^2. \quad (10.80)$$

Подставляя полученные выражения в (10.78), определим полную кинетическую энергию ротора двигателя.

Если звено ротора (т. е. $(i-1)$ -е звено) в инерциальной системе отсчета участвует только в поступательном движении, то абсолютная угловая скорость этого звена $\omega_{i-1} = 0$, и, таким образом, третье слагаемое в (10.78) тоже будет равно нулю.

В случае электромеханических манипуляторов, у которых передаточные числа редукторов i очень велики ($i = 1000 \dots 2000$), влияние (10.80) существенно больше, чем (10.79). Это объясняется тем, что выражение (10.80) зависит от квадрата передаточного числа i , а (10.79) лишь пропорционально ему. Поэтому в первом приближении при оценке вклада двигателей приводов в кинетическую энергию исполнительного органа робота нужно использовать выражение (10.80).

Аналогично может быть определена кинетическая энергия других звеньев передаточного механизма.

Определение управляющих воздействий и закона движения звеньев. На основании дифференциальных уравнений движения исполнительного органа промышленного робота (10.33) можно решать две задачи динамики — первую и вторую. В первой задаче динамики известными считаются геометрические, упругомассовые параметры, законы изменения обобщенных координат механизма и внешние активные силы, действующие на него, при этом искомыми являются управляющие воздействия — моменты и усилия, развиваемые приводами.

Так, из дифференциальных уравнений (10.33) с учетом (10.37) следует:

$$Q_{pk} = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_{pk} \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (10.81)$$

Например, для манипулятора промышленного робота (рис. 10.13, а) управляющие моменты согласно (10.81) будут соответственно равны:

$$M_{z1} = a_{11} \ddot{q}_1 + b_{12} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + b_{13} \dot{q}_1 \dot{q}_3;$$

$$M_{z2} = a_{22} \ddot{q}_2 + 0,5 a_{23} \ddot{q}_3 + b_{23} \dot{q}_2 \dot{q}_3 + b_{33} \dot{q}_3^2 + b_{11} \dot{q}_1^2 = c_{22};$$

$$M_{z3} = a_{33} \ddot{q}_3 + 0,5 a_{23} \ddot{q}_2 + \frac{1}{2} b_{23} \dot{q}_2^2 + b_{33} \dot{q}_1^2 = c_{33}.$$

Найденные моменты приводов используют для осуществления необходимого режима движения звеньев манипулятора. Кроме того, максимальные значения найденных моментов позволяют выбрать необходимый двигатель привода звена манипулятора на этапе его проектирования. Управляющие воздействия по всем трем обобщенным координатам φ_1 , φ_2 , φ_3 оказались взаимосвязанными.

В случае промышленного робота со многими степенями свободы и при сложном законе движения звеньев манипулятора управляющие воздействия рассчитывают на ЭВМ, при этом целесообразно уравнения динамики представлять в виде (10.36),

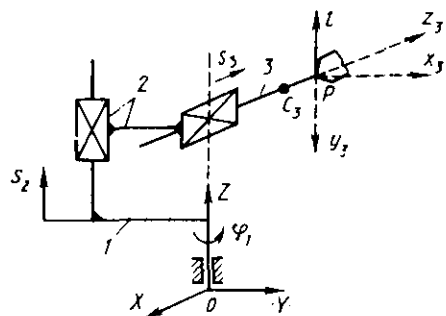


Рис. 10.15. Кинематическая схема промышленного робота РБ-232

когда коэффициенты уравнений выражены с помощью матриц.

Во второй задаче динамики известными считаются геометрические, упругомассовые параметры манипулятора, внешние активные силы и управляющие воздействия... моменты и усилия, развиваемые приводами. Кроме того, известными считаются начальные значения обобщенных координат и обобщенных скоростей. Требуется определить законы изменения обобщенных координат и обобщенных ско-

ростей. Решение второй задачи динамики сводится к численному интегрированию системы нелинейных дифференциальных уравнений движения (10.33) на ЭВМ.

Исследование колебательных свойств манипулятора промышленного робота. Движение каждого из звеньев манипулятора можно разделить на три этапа: разгон, установившееся движение, торможение. Для повышения быстродействия увеличивают скорости и ускорения звеньев на всех этапах. Однако при быстром разгоне и резком торможении возбуждаются колебания манипулятора, обусловленные упругими свойствами конструкции. Возникающие колебания снижают точность позиционирования, а время их затухания до допустимого уровня увеличивает время выполнения операции.

Упругая податливость манипулятора складывается из упругой податливости его звеньев и упругой податливости механизмов приводов, которая бывает более значительной. Упругая податливость механизмов приводов на расчетной схеме манипулятора с жесткими звеньями учитывается в виде безмассовых упругих связей в кинематических парах.

Отклонения от программного движения, вызванные податливостью приводов, рассматривают как динамические ошибки. Обобщенные координаты представляют в этом случае в виде [23]

$$q_i = q_{in} + \alpha_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (10.82)$$

где q_{in} ($i = 1, 2, \dots, n$) характеризуют программное движение манипулятора (движение жесткого скелета), а α_i ($i = 1, 2, \dots, n$) описывает малые колебания системы вблизи программного движения, вызванные податливостью приводов.

Проиллюстрируем вывод дифференциальных уравнений малых колебаний манипулятора на примере промышленного робота РБ-232, кинематическая схема которого представлена на рис. 10.15. Рабочими движениями этого робота являются поворот звена 1 вокруг вертикальной оси, вертикальное перемещение звена 2 и выдвижение руки 3, несущей схват. Выберем за обобщенные координаты соответственно угол поворота первого звена φ_1 и относительные линейные перемещения s_2 и s_3 соответственно второго и третьего звеньев. Свяжем с третьим звеном систему координат $px_3y_3z_3$, инерциальная система координат $OXYZ$ связана с неподвижной стойкой.

Кинетическую энергию манипулятора можно представить в виде

$$T = 0,5 [J_z^{(1)} + J_z^{(2)} + J_{y_3}^{(3)}] \dot{\varphi}_1^2 + 0,5 (m_2 + m_3) \dot{s}_2^2 + + 0,5 m_3 (\dot{s}_3^2 + s_3^2 \dot{\varphi}_1^2) + m_3 \dot{\varphi}_1^2 z_{c_3}^{(3)} s_3, \quad (10.83)$$

где $J_z^{(1)}$, $J_z^{(2)}$, $J_{y_3}^{(3)}$ — моменты инерции соответственно первого, второго и третьего звеньев относительно осей z и y_3 (моменты инерций механизмов приводов считаем приведенными к соответствующим осям кинематических пар); m_2 , m_3 — массы второго и третьего звеньев; $z_{c_3}^{(3)}$ — координата z центра масс третьего звена в связанной с ним системе.

Согласно (10.82), обобщенные координаты представим в виде

$$\varphi_1 = \varphi_{1n} + \alpha_1; \quad s_2 = s_{2n} + \alpha_2; \quad s_3 = s_{3n} + \alpha_3, \quad (10.84)$$

где φ_{1n} , s_{2n} , s_{3n} соответствуют одному из программных движений. Подставив (10.84) в (10.83), получаем

$$T = 0,5 \{ (J_z^{(1)} + J_z^{(2)} + J_{y_3}^{(3)}) (\dot{\varphi}_{1n} + \dot{\alpha}_1)^2 + (m_2 + m_3) (\dot{s}_{2n} + \dot{\alpha}_2)^2 + + m_3 [(\dot{s}_{3n} + \dot{\alpha}_3)^2 + (s_{3n} + \alpha_3)^2 (\dot{\varphi}_{1n} + \dot{\alpha}_1)^2] + 2m_3 (\dot{\varphi}_{1n} + \dot{\alpha}_1) (\dot{s}_{3n} + \dot{\alpha}_3) z_{c_3}^{(3)} \}. \quad (10.85)$$

Сохраняя в этом выражении члены вплоть до второго порядка относительно малых величин α_i , $\dot{\alpha}_i$, имеем

$$T = 0,5 \{ (J_z^{(1)} + J_z^{(2)} + J_{y_3}^{(3)}) (\dot{\varphi}_{1n} + \dot{\alpha}_1)^2 + (m_2 + m_3) (\dot{s}_{2n} + \dot{\alpha}_2)^2 + + m_3 (\dot{s}_{3n} + \dot{\alpha}_3)^2 + m_3 s_{3n}^2 (\dot{\varphi}_{1n} + \dot{\alpha}_1)^2 + 2m_3 s_{3n} \alpha_3 \dot{\varphi}_{1n}^2 + 4m_3 s_{3n} \alpha_3 \dot{\varphi}_{1n} \dot{\alpha}_1 + + m_3 \dot{\varphi}_{1n}^2 \alpha_3^2 + 2m_3 z_{c_3}^{(3)} s_{3n} (\dot{\varphi}_{1n} + \dot{\alpha}_1)^2 + 2m_3 z_{c_3}^{(3)} \alpha_3 \dot{\varphi}_{1n}^2 + 4m_3 z_{c_3}^{(3)} \dot{\varphi}_{1n} \dot{\alpha}_1 \alpha_3 \}.$$

Потенциальная энергия деформации передаточных механизмов приводов запишется следующим образом:

$$\Pi = 0,5 (c_1 \alpha_1^2 + c_2 \alpha_2^2 + c_3 \alpha_3^2), \quad (10.86)$$

где c_1, c_2, c_3 — жесткости приводов, приведенные к соответствующим осям кинематических пар.

Потенциальная энергия сил тяжести в (10.86) не выписана, так как отсчет упругих деформаций ведется от их значений в положении статического равновесия механизма.

Обобщенные силы определяются соотношениями [24]

$$Q_i = - \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha_i} \quad (i = 1, 2, 3). \quad (10.87)$$

Составляя уравнения движения в форме

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_i} - \frac{\partial T}{\partial \alpha_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (10.88)$$

получим

$$\begin{cases} f_{11}(t) \ddot{\alpha}_1 + f_{12}(t) \dot{\alpha}_1 + c_1 \alpha_1 + f_{13}(t) \ddot{\alpha}_3 + f_{14}(t) \dot{\alpha}_3 = f_{10}; \\ (m_2 + m_3) \ddot{\alpha}_2 + c_2 \alpha_2 = -(m_2 + m_3) \ddot{s}_{2n}; \\ m_3 \ddot{\alpha}_3 + f_{31}(t) \dot{\alpha}_3 + f_{32}(t) \dot{\alpha}_1 = f_{30}, \end{cases} \quad (10.89)$$

где

$$\begin{aligned} f_{11}(t) &= J_z^{(1)} + J_z^{(2)} + J_{y_1}^{(3)} + m_3 (s_{3n}^2 + 2z_{c_3}^{(3)} s_{3n}); \\ f_{12}(t) &= 2m_3 (s_{3n} + z_{c_3}^{(3)}) \dot{s}_{3n}; \\ f_{13}(t) &= 2m_3 (s_{3n} + z_{c_3}^{(3)}) \dot{\varphi}_{1n}; \\ f_{14}(t) &= 2m_3 (\dot{s}_{3n} \dot{\varphi}_{1n} + s_{3n} \ddot{\varphi}_{1n} + z_{c_3}^{(3)} \ddot{\varphi}_{1n}); \\ f_{10}(t) &= [(J_z^{(1)} + J_z^{(2)} + J_{y_1}^{(3)}) \ddot{\varphi}_{1n} + 2m_3 s_{3n} \dot{s}_{3n} \dot{\varphi}_{1n} + m_3 s_{3n}^2 \ddot{\varphi}_{1n} + \\ &+ 2m_3 z_{c_3}^{(3)} \dot{s}_{3n} \dot{\varphi}_{1n} + 2m_3 z_{c_3}^{(3)} s_{3n} \ddot{\varphi}_{1n}]; \\ f_{31}(t) &= (c_3 - m_3 \dot{\varphi}_{1n}^2); \\ f_{32}(t) &= -2m_3 (s_{3n} + z_{c_3}^{(3)}) \dot{\varphi}_{1n}; \\ f_{30}(t) &= -m_3 \ddot{s}_{3n} + m_3 s_{3n} \dot{\varphi}_{1n}^2 + m_3 z_{c_3}^{(3)} \dot{\varphi}_{1n}^2 \end{aligned}$$

— функции времени, зависящие от программного движения робота.

Наибольший интерес представляет исследование движения манипулятора на этапе торможения, так как именно упругие колебания, возникающие при торможении, снижают прочность позиционирования. Чтобы исследовать движения манипулятора при подходе к конечному положению равновесия, в первом приближении считают обобщенные координаты, характеризующие программное движение, константами, соответствующими конечной конфигурации манипулятора.

Так, например, в рассматриваемой задаче (рис. 10.15) можно положить $\varphi_{1п} = \psi = \text{const}$, $s_{2п} = l_1 = \text{const}$, $s_{3п} = l_3 = \text{const}$. Тогда уравнения движения (10.89) примут вид

$$\begin{aligned} a_{11} \ddot{\alpha}_1 + c_1 \alpha_1 &= 0; \quad (m_2 + m_3) \ddot{\alpha}_2 + c_2 \alpha_2 = 0; \\ m_3 \ddot{\alpha}_3 + c_3 \alpha_3 &= 0, \end{aligned} \quad (10.90)$$

где константа $a_{11} = J_z^{(1)} + J_z^{(2)} + J_z^{(3)} + m_3(l_3^2 + 2l_2l_3^{(3)})$.

В этом случае, как следует из (10.90), малые отклонения звеньев от программного движения являются динамически независимыми между собой и представляют собой свободные гармонические колебания. Круговая частота этих колебаний в основном зависит от упругомассовых характеристик манипулятора.

Так, например, круговая частота каждого из звеньев манипулятора определится соответственно по формулам:

$$k_1 = \sqrt{\frac{c_1}{a_{11}}}; \quad k_2 = \sqrt{\frac{c_2}{m_2 + m_3}}; \quad k_3 = \sqrt{\frac{c_3}{m_3}}.$$

Амплитуда собственных колебаний зависит от начальных значений функций α_i , $\dot{\alpha}_i$, т. е. от α_{i0} и $\dot{\alpha}_{i0}$ ($i = 1, 2, 3$).

$$A_i = \sqrt{\alpha_{i0}^2 + \frac{\dot{\alpha}_{i0}^2}{k_i^2}}.$$

При рассмотрении данного примера не учитывалось демпфирование в упругих звеньях. При наличии демпфирования собственные колебания затухают, однако в механизмах, работающих в режимах разгона и торможения, они могут поддерживаться постоянно.

При учете демпфирования в упругих звеньях уравнения Лагранжа II рода (10.88, 10.87) записывают следующим образом [23]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_i} - \frac{\partial T}{\partial \alpha_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

где $\Phi = \frac{1}{2} \sum_i b_i \dot{\alpha}_i^2$ — диссипативная функция, связанная с демпфированием в упругих звеньях.

Большой практический интерес представляет определение вынужденных колебаний звеньев манипулятора, возбуждаемых или колебаниями основания, на котором установлен манипулятор, или периодически изменяющимися силами, возникающими при работе манипулятора и обусловленными неточностями изготовления и сборки механизмов.

В силу связанности движения по координатам колебания одного упругого звена могут возбуждать колебания других звеньев. В уравнениях движения эти возмущения учитывают в виде сил и моментов, зависящих от параметров системы и времени.

Исследование точности позиционирования промышленного робота. Одной из основных технических характеристик робота, определяющих его пригодность для выполнения заданной технологической операции, является точность позиционирования. Она определяется точностью попадания характеристической точки рабочего органа в заданную точку рабочей зоны. Роботы с различным технологическим назначением — транспортные, сварочные, сборочные и т. д. — имеют разные показатели точности позиционирования.

На практике каждому промышленному роботу присущи погрешности позиционирования, которые могут быть обусловлены разными причинами: неточностью изготовления и износом элементов кинематических пар, погрешностями работы приводов, наличием деформаций звеньев и их упругими колебаниями около программного движения. В связи с этим различают геометрические, статические и динамические ошибки позиционирования [14]. Кроме того, величины ошибок при позиционировании рабочего органа существенно зависят от конфигурации кинематической цепи манипулятора [25], что должно учитываться на стадии планирования программной траектории. Количественно точность позиционирования оценивается величиной отклонения действительного положения характеристической точки рабочего органа от теоретического.

Согласно (10.9), радиус-вектор характеристической точки в инерциальной системе координат можно представить в виде функции обобщенных координат манипулятора и конструктивных параметров h_j ($j = 1, \dots, r$):

$$\bar{r}_p = \bar{r}_p(q_1, q_2, \dots, q_n, h_1, \dots, h_r). \quad (10.91)$$

Рассмотрим геометрические ошибки позиционирования, которые обусловлены отклонением размеров и формы звеньев действительных механизмов от проектируемых, зазорами в кинематических парах, погрешностями в отработке приводов. Все это вызывает отклонения Δq_i ($i = 1, \dots, n$) обобщенных координат q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) от заданных значений q_i , а следовательно, и отклонения рабочего органа от номинального положения.

Для достаточно малых Δq_i ($i = 1, \dots, n$) вектор $\Delta \bar{r}_p$ уклонения рабочего органа определяется приближенно дифференциалом (10.91) в котором дифференциалы обобщенных координат (dq_i) заменены малыми отклонениями Δq_i :

$$\Delta \bar{r}_p = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \bar{r}_p}{\partial q_i} \Delta q_i + \sum_{j=1}^r \frac{\partial \bar{r}_p}{\partial h_j} \Delta h_j. \quad (10.92)$$

При записи (10.92) учтено, что конструктивные параметры манипулятора могут иметь погрешности Δh_j ($j = 1, \dots, r$).

Согласно (10.92), погрешности позиционирования в направлении декартовых осей инерциальной системы координат определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta x_p &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial x_p}{\partial q_i} \Delta q_i + \sum_{j=1}^r \frac{\partial x_p}{\partial h_j} \Delta h_j; \quad \Delta y_p = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y_p}{\partial q_i} \Delta q_i \\ &+ \sum_{j=1}^r \frac{\partial y_p}{\partial h_j} \Delta h_j; \quad \Delta z_p = \sum_{i=1}^n \frac{\partial z_p}{\partial q_i} \Delta q_i + \sum_{j=1}^r \frac{\partial z_p}{\partial h_j} \Delta h_j; \end{aligned} \quad (10.93)$$

модуль вектора

$$|\Delta r_p| = \sqrt{\Delta x_p^2 + \Delta y_p^2 + \Delta z_p^2}. \quad (10.94)$$

Определим, например, геометрические ошибки позиционирования манипулятора, кинематическая схема которого изображена на рис. 10.5, вызванные только ошибкой Δa в конструктивном параметре a .

Согласно (10.92), (10.93) и (10.94),

$$\Delta x_p = 0, \quad \Delta y_p = 0, \quad \Delta z_p = \Delta a, \quad \Delta r_p = \Delta a,$$

т. е. ошибка в конструктивном параметре a без изменения перешла в ошибку позиционирования.

Проиллюстрируем определение геометрической ошибки позиционирования того же манипулятора, вызванные не только ошибкой в конструктивном параметре a , а также ошибкой Δs_3 в отработке поступательного движения третьего звена.

Согласно (10.12), (10.93) и (10.94), получим:

$$\Delta x_p = \sin \Theta \cdot \Delta s_3, \quad \Delta y_p = \cos \Theta \cdot \Delta s_3,$$

$$\Delta z_p = \Delta a, \quad \Delta r_p = \sqrt{\Delta s_3^2 + \Delta a^2} \text{ и т. д.}$$

Под статическими ошибками позиционирования понимают смещения характеристической точки рабочего органа от ее положения равновесия, вызванные силами тяжести звеньев манипулятора и объекта манипулирования за счет упругой податливости звеньев и механизмов приводов.

Рассмотрим статические ошибки позиционирования, связанные с упругой податливостью механизмов приводов [24].

Пусть c_i — жесткость соединения $(i-1)$ -го и i -го звеньев, а $e_i = 1/c_i$ — податливость. Тогда обобщенная координата q_i , определяющая положение i -го звена по отношению к предыдущему, получит приращение по сравнению с ее значением в состоянии равновесия жесткого манипулятора

$$\Delta q_i = e_i Q_i, \quad (10.95)$$

где Q_i — обобщенная сила, соответствующая координате q_i и определяемая соотношением (10.38). Подставляя (10.38) в (10.95), предварительно заменив в (10.38) индекс k на i и наоборот, получим

$$\Delta q_i = e_i \sum_{k=1}^n \left[F_{kx} \frac{\partial x_k}{\partial q_i} + F_{ky} \frac{\partial y_k}{\partial q_i} + F_{kz} \frac{\partial z_k}{\partial q_i} \right]. \quad (10.96)$$

Для того чтобы оценить ошибку позиционирования, обусловленную приращениями обобщенных координат (10.96), подставим (10.96) в (10.93), полагая при этом конструктивные погрешности $\Delta h_i = 0$. В результате получим

$$\Delta x_p = \sum_{i=1}^n \frac{\partial x_p}{\partial q_i} e_i \sum_{k=1}^n \left(F_{kx} \frac{\partial x_k}{\partial q_i} + F_{ky} \frac{\partial y_k}{\partial q_i} + F_{kz} \frac{\partial z_k}{\partial q_i} \right);$$

$$\Delta y_p = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y_p}{\partial q_i} e_i \sum_{k=1}^n \left(F_{kx} \frac{\partial x_k}{\partial q_i} + F_{ky} \frac{\partial y_k}{\partial q_i} + F_{kz} \frac{\partial z_k}{\partial q_i} \right);$$

$$\Delta z_p = \sum_{i=1}^n \frac{\partial z_p}{\partial q_i} e_i \sum_{k=1}^n \left(F_{kx} \frac{\partial x_k}{\partial q_i} + F_{ky} \frac{\partial y_k}{\partial q_i} + F_{kz} \frac{\partial z_k}{\partial q_i} \right),$$

или, изменив порядок суммирования,

$$\Delta x_p = \sum_{k=1}^n \left(F_{kx} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial x_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial x_k}{\partial q_i} + F_{ky} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial x_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial y_k}{\partial q_i} + \right. \\ \left. + F_{kz} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial x_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial z_k}{\partial q_i} \right);$$

$$\Delta y_p = \sum_{k=1}^n \left(F_{kx} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial y_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial x_k}{\partial q_i} + F_{ky} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial y_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial y_k}{\partial q_i} + \right. \\ \left. + F_{kz} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial y_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial z_k}{\partial q_i} \right);$$

$$\Delta z_p = \sum_{k=1}^n \left(F_{kx} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial z_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial x_k}{\partial q_i} + F_{ky} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial z_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial y_k}{\partial q_i} + \right. \\ \left. + F_{kz} \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial z_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial z_k}{\partial q_i} \right).$$

Коэффициенты при F_{kx} , F_{ky} , F_{kz} имеют смысл податливостей. Обозначим $e_{si}^{(k)}$ податливость в рассматриваемой точке $p(x, y, z)$ в направле-

нии оси z , соответствующую проекции силы F_h на ось l . Тогда для определения статической ошибки получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_p &= \sum_{k=1}^n \{e_{xx}^{(k)} F_{hx} + e_{xy}^{(k)} F_{hy} + e_{xz}^{(k)} F_{hz}\}; \\ \Delta y_p &= \sum_{k=1}^n \{e_{yx}^{(k)} F_{hx} + e_{yy}^{(k)} F_{hy} + e_{yz}^{(k)} F_{hz}\}; \\ \Delta z_p &= \sum_{k=1}^n \{e_{zx}^{(k)} F_{hx} + e_{zy}^{(k)} F_{hy} + e_{zz}^{(k)} F_{hz}\}, \end{aligned} \right\} \quad (10.97)$$

где

$$\left. \begin{aligned} e_{xx}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial x_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial x_h}{\partial q_i}; & e_{xy}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial x_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial y_h}{\partial q_i}; \\ e_{xz}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial x_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial z_h}{\partial q_i}; & e_{yx}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial y_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial x_h}{\partial q_i}; \\ e_{yy}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial y_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial y_h}{\partial q_i}; & e_{yz}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial y_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial z_h}{\partial q_i}; \\ e_{zx}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial z_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial x_h}{\partial q_i}; & e_{zy}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial z_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial y_h}{\partial q_i}; \\ e_{zz}^{(k)} &= \sum_{i=1}^n e_i \frac{\partial z_p}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial z_h}{\partial q_i}. \end{aligned} \right\} \quad (10.98)$$

В качестве примера определим статическую ошибку позиционирования от воздействия силы тяжести объекта манипулирования F_3 (см. рис. 10.5). Так как $F_{3x} = F_{3y} = 0$, $F_{3z} = -F_3$, то (10.97) примут вид:

$$\Delta x_p = -e_{xz}^{(k)} F_3; \quad \Delta y_p = -e_{yz}^{(k)} F_3; \quad \Delta z_p = -e_{zz}^{(k)} F_3. \quad (10.99)$$

В рассматриваемом примере положение рабочего органа определяется тремя обобщенными координатами:

$$q_1 = s_1; \quad q_2 = \theta; \quad q_3 = s_3.$$

Согласно (10.98) и (10.12),

$$e_{xz} = 0; \quad e_{yz} = 0; \quad e_{zz} = e_3. \quad (10.100)$$

Подставляя (10.100) в (10.99), найдем статическую ошибку позиционирования

$$\Delta z_p = -e_3 F_3.$$

Как уже было оговорено ранее, под динамической ошибкой позиционирования понимают отклонения рабочего органа от номинального положения, обусловленные колебаниями механизма. Общую (результатирующую) ошибку позиционирования определяют как сумму геометрической, статической и динамической ошибок:

$$\Delta \bar{r}_p^{об} = \Delta \bar{r}_{p,геом} + \Delta \bar{r}_{p,ст} + \Delta \bar{r}_{p,дин}. \quad (10.101)$$

По полученному значению ошибки позиционирования проверяют соответствие робота его функциональному назначению

$$|\Delta \bar{r}_p^{об}| \leq [\Delta r], \quad (10.102)$$

где $[\Delta r]$ — допускаемое значение ошибки.

Совместное рассмотрение условия (10.100) и соотношений (10.101), (10.92), (10.98) и других позволяет оценить влияние структуры манипулятора, размеров звеньев, технологических погрешностей, упругих податливостей звеньев и механизмов приводов на точность позиционирования. На стадии проектирования указанные соотношения используют для обоснованного выбора кинематической схемы, конструктивных и технологических параметров.

Пример расчета производительности ПР на основе его динамической модели. Рассмотрим пример расчета производительности промышленного робота с пневмоприводом и цикловой системой управления (типа ПР-4, рис. 10.5).

Повышение быстродействия ПР, т. е. уменьшение времени перемещения манипулятора из позиции в позицию, является одной из центральных задач использования ПР любого типа. Уменьшение времени перемещения манипулятора, как правило, достигается путем повышения скоростей движения его звеньев. Однако это может привести к удару поршня пневмопривода с жестким упором, что резко понизит точность позиционирования рабочего органа ПР. Таким образом, необходимо обеспечить плавную, практически безударную, остановку поршня пневмопривода при подходе его к крайнему положению. Плавная остановка поршня пневмопривода достигается посредством введения гидравлических тормозных устройств. В этом случае возникает задача устранения в начале тормозного пути эффекта, равносильного удару.

Время перемещения манипулятора ПР из позиции в позицию зависит от магистрального давления пневмопривода (p_m), от величины тормозного пути и параметров тормозного устройства. В связи с этим возникает задача об определении оптимальных магистрального давления, величины площади сливного отверстия гидротормоза, а также величины тормозного пути, обеспечивающих максимальное быстродействие ПР при указанных ограничениях (практически безударное начало и конец торможения). Кроме того, следует исследовать вопрос о повышении быстродействия ПР в результате одновременного движения части его звеньев. В случае, когда одно из звеньев совершает по-

ступательное движение (первое или третье звено), дифференциальное уравнение движения

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - P_{ij} \quad (i = 1, 3; j = 1, 2), \quad (10.103)$$

где m_{ij} — масса поступательно перемещающейся части системы при движении i -го звена (условимся считать, что значение индекса $j = 1$ соответствует рабочему движению звена, а $j = 2$ — холостому); P_{ij} — сумма проекций всех внешних сил (кроме сил давления воздуха на поршень пневмоцилиндра), действующих на движущуюся часть системы, на направление, противоположное направлению движения системы; p_1 — давление воздуха в рабочей полости пневмоцилиндра; p_2 — давление воздуха в выпускной полости; F_1 и F_2 — площади торцов поршня пневмоцилиндра соответственно со стороны рабочей и выпускной полостей.

С помощью зубчато-реечной передачи осуществляется преобразование поступательного движения поршня пневмоцилиндра во вращательное движение второго звена манипулятора.

Дифференциальное уравнение движения при работе пневмопривода только второго звена может быть приведено к виду

$$J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = (p_1 F_1 - p_2 F_2) r - P_{ij} r \quad (i = 2, j = 1, 2), \quad (10.104)$$

где r — радиус зубчатого колеса; J_z — момент инерции вращающейся части механической системы относительно оси вращения.

Учитывая, что линейное перемещение поршня пневмопривода 2-го звена $x_i = r\varphi$ ($i = 2$), выражение (10.104) запишем в виде

$$m_{2j} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = (p_1 r_1 - p_2 r_2) - P_{ij} \quad (i = 2; j = 1, 2), \quad (10.105)$$

где m_{2j} — суммарная масса подвижной части системы (при вращении второго звена); r — радиус инерции этой системы относительно оси вращения (определяется экспериментально).

Если в некоторой точке хода поршня пневмопривода ($x_i = x_{ni}$ ($i = 1, 2, 3$)) подключается гидротормозное устройство, то дифференциальные уравнения движения звеньев манипулятора будут иметь вид:

$$m_{ij} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - P_{ij} - \zeta \frac{\gamma F_a^3}{2f_a^2} \left(\frac{dx_i}{dt} \right)^2 \quad (i = 1, 3; j = 1, 2); \quad (10.106)$$

$$m_{ij} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \left[p_1 F_1 - p_2 F_2 - \zeta \frac{\gamma F_a^3}{2f_a^2} \left(\frac{dx_i}{dt} \right)^2 - P_{ij} \right] \frac{r^2}{\rho^2} \quad (i = 2; j = 1, 2), \quad (10.107)$$

где F_a — рабочая площадь гидроцилиндра; γ — плотность жидкости; f_a — площадь отверстия слива ξ — коэффициент, определяемый экспериментально.

Для численного решения задачи более удобна безразмерная форма представления вышеприведенных уравнений. Введем следующие безразмерные параметры:

$$\xi_i = \frac{x_i}{s_i}, \quad \xi_{ni} = \frac{x_{ni}}{s_i}; \quad \sigma_a = \frac{p_a}{p_m}; \quad \sigma = \frac{p}{p_m}; \quad \tau_i = \frac{t_i}{t_{mi}};$$

$$t_{mi} = \frac{F_i s_i}{\mu f K \sqrt{RT_m}}; \quad x_{ij} = \frac{P_{ij}}{p_m F_i};$$

$$I = \frac{r^2}{\rho^2}; \quad \Psi_{ij} = \xi \frac{1}{2} \gamma \frac{F_a^3 s_i}{m_{ij} f_a^2}; \quad N_{ij} = \frac{\mu f K}{F_i} \sqrt{\frac{m_{ij} RT_m}{p_m F_i s_i}},$$

где s_i — ход поршня пневмопривода i -го звена; p_a — атмосферное давление; f — площадь входного отверстия пневмоцилиндра; μ — коэффициент расхода подводящей и выхлопной линий пневмоцилиндра (определяется экспериментально).

Наиболее распространены в практике машиностроения следующие значения коэффициента μ : $\mu = 0,2, \dots, 0,8$,

$$K = \sqrt{\frac{2gk}{k-1}},$$

где k — показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,4$); R — газовая постоянная (для сухого воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К)); T_m — абсолютная температура воздуха в магистрали (измеряется по абсолютной шкале Кельвина $T = 273$); t — температура по шкале Цельсия.

В безразмерной форме дифференциальные уравнения движения звеньев манипулятора (10.103), (10.105), (10.106), (10.107) примут соответственно вид:

$$\frac{d^2 \xi_i}{d\tau^2} = \frac{1}{N_{ij}^2} (\sigma_1 - \sigma_2 - \chi_{ij}) \text{ при } \xi_i \leq \xi_{ni} \quad (i = 1, 3; j = 1, 2); \quad (10.108)$$

$$\frac{d^2 \xi_i}{d\tau^2} = \frac{1}{N_{ij}^2} (\sigma_1 - \sigma_2 - \chi_{ij}) \text{ при } \xi_i \leq \xi_n \quad (i = 2; j = 1, 2); \quad (10.109)$$

$$\frac{d^2 \xi_i}{d\tau^2} = \frac{1}{N_{ij}^2} (\sigma_1 - \sigma_2 - \chi_{ij}) - \Psi_{ij} \left(\frac{d\xi_i}{d\tau} \right)^2 \text{ при } \xi_{ni} \leq \xi_i \leq 1; \quad (10.110)$$

($i = 1, 3; j = 1, 2$);

$$\frac{d^2 \xi_i}{d\tau^2} = \frac{1}{N_{ij}^2} (\sigma_1 - \sigma_2 - \chi_{ij}) - I \Psi_{ij} \left(\frac{d\xi_i}{d\tau} \right)^2$$

при $\xi_{ni} \leq \xi_i \leq 1$ ($i = 2, j = 1, 2$). (10.111)

При записи уравнений (10.108)—(10.111) было принято, что $F_1 = F_2$. В работе [16] приведены дифференциальные уравнения, оп-

ределяющие изменения давления воздуха p_1 и p_2 в полостях пневмоцилиндра, которые могут быть решены только численными методами на ЭВМ.

Представляется целесообразным найти приближенные формулы, позволяющие инженеру получить качественную картину влияния тех или иных параметров на динамику робота. С этой целью используются приведенные в работе [25] рекомендации, позволяющие установить области изменения характеристик пневмопривода, для которых возможно применение приближенных методов расчета, основанных на рассмотрении предельных случаев движения поршня – равномерного и равноускоренного.

Для установления границ изменения безразмерных параметров, при которых имеет место равномерное установившееся или равноускоренное движение звеньев манипулятора, необходимо найти безразмерный параметр N_{ij}^{np} [25] по формуле

$$N_{ij}^{np} = \frac{\sqrt{1 - \sigma_{ij}} \chi_{ij}}{\sqrt{2} \xi_{ii}},$$

где ξ_{ii} – установившаяся скорость поршня пневмопривода i -го звена.

Значения установившейся скорости ξ_{ii} и установившегося давления в рабочей полости σ_{ij} приведены в [25].

Если конструктивный параметр $N_{ij} < N_{ij}^{np}$, то движение можно рассматривать как равномерное, если $N_{ij} > N_{ij}^{np}$ – как равноускоренное.

В случае установившегося движения поршня пневмопривода на участке $0 \leq \xi \leq \xi_{ii}$ время движения

$$\tau_{yi} = \xi_{ii} / \dot{\xi}_{yi}. \quad (10.112)$$

В результате решения дифференциальных уравнений (10.108)–(10.111) можно определить время торможения всех звеньев манипулятора:

$$\tau_{ji} = \frac{1}{\dot{\xi}_{yi} \Psi_{ij}} (e^{(1 - \xi_k) \Psi_{ij}} - 1) \quad (i = 1, 3; \quad j = 1, 2); \quad (10.113)$$

$$\tau_{ji} = \frac{1}{\dot{\xi}_{yi} \Psi_{ij}} (e^{(1 - \xi_k) \Psi_{ij}} - 1) \quad (i = 2; \quad j = 1, 2). \quad (10.114)$$

При получении соотношений (10.113) и (10.114) было принято предположение о том, что на участке торможения давления в полостях пневмоцилиндра остаются равными их установившимся значениям σ_{1y} и σ_{2y} . Если давление в рабочей полости пневмоцилиндра практически в течение всего периода движения остается равным магистральному ($\sigma_1 = 1$, $p = p_n$) и одновременно с этим противодействие сравнивается с атмосферным давлением ($\sigma_2 = \sigma_n$, $p_2 = p_n$), то закон движения поршня будет равноускоренным.

Время равноускоренного движения звеньев манипулятора легко определяется путем интегрирования уравнений соответственно (10.108) и (10.109):

$$\tau_{yi} = N_{ij} \sqrt{\frac{2\xi_{ij}}{1 - \sigma_a - \chi_{ij}}} \quad (i = 1, 3; j = 1, 2);$$

$$\tau_{yi} = \frac{N_{ij}}{\sqrt{I}} \sqrt{\frac{2\xi_{ij}}{1 - \sigma_a - \chi_{ij}}} \quad (i = 2; j = 1, 2).$$

В результате решения дифференциальных уравнений (10.110) и (10.111) определим время торможения каждого звена манипулятора:

$$\tau_{ti} = \frac{1}{2\psi_{ij} D_{ij}} \ln \frac{(D_{ij} + 1)(D_{ij} - \xi_{ij})}{(D_{ij} - 1)(D_{ij} + \xi_{ij})} \quad (i = 1, 3; j = 1, 2); \quad (10.115)$$

$$\tau_{ti} = \frac{1}{2I\psi_{ij} D_{ij}} \ln \frac{(D_{ij} + 1)(D_{ij} - \xi_{ij})}{(D_{ij} - 1)(D_{ij} + \xi_{ij})} \quad (i = 2; j = 1, 2), \quad (10.116)$$

где

$$D_{ij} = \sqrt{\frac{1 - \sigma_a - \chi_{ij}}{\psi_{ij} N_{ij}^2}}.$$

При получении соотношений (10.115) и (10.116) было принято предположение о том, что на участке торможения давления в полостях пневмоцилиндра остаются равными соответственно магистральному и атмосферному давлению ($\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = \sigma_a$).

Общее время срабатывания приводов каждого из звеньев в обоих рассмотренных выше случаях определяется по формуле

$$\tau_i = \tau_{ni} + \tau_{yi} + \tau_{ti},$$

где τ_{ni} — время подготовительного периода i -го звена; τ_{yi} — время установившегося или равноускоренного движения i -го звена; τ_{ti} — время торможения i -го звена.

Подготовительный период охватывает интервал времени, когда в рабочей полости давление увеличивается, а в выпускной уменьшается, причем эти процессы протекают до тех пор, пока в обеих полостях не установится перепад давлений, при котором движущая сила преодолевает силы сопротивления и поршень сдвинется с места. Для определения времени подготовительного периода τ_{ni} пользуются формулой расчета времени истечения сжатого воздуха из выпускной полости

$$\tau_{ni} = \frac{2}{(k-1) \cdot \psi(\sigma) \cdot \sigma_a^{(k-1)/2k}} \left[\psi_2 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{22}} \right) - \psi_2 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{21}} \right) \right].$$

Значения функции $\psi_2 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{21}} \right)$ и $\psi_2 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{22}} \right)$ равные $\psi_2(\sigma)$ и соответствующие начальному σ_{21} и конечному σ_{22} значениям давления

в выхлопной полости, можно определить по графику, приведенному в работе [25].

Для того чтобы обеспечить практически плавное начало торможения и остановку поршня пневмопривода при подходе его к крайнему положению, необходимо на основные кинематические и динамические параметры наложить следующие ограничения.

В случае установившегося движения:

$$\dot{\xi}_{yi} \cdot e^{-(1-\xi_n)\Psi_{ij}} \leq \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta s_i (\sigma_{1y} - \sigma_{2y} - \chi_{ij}^*)}}{nN_{ij}} \quad (i = 1, 3; j = 1, 2); \quad (10.117)$$

$$\dot{\xi}_{yi} e^{-(1-\xi_n)\Psi_{ij}} \leq \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta s_i \cdot I (\sigma_{1y} - \sigma_{2y} - \chi_{ij}^*)}}{nN_{ij}} \quad (i = 2; j = 1, 2); \quad (10.118)$$

$$\Psi_{ij} \dot{\xi}_{yi}^2 \leq a_i g \frac{l_{mi}^2}{s_i} \quad (i = 1, 3; j = 1, 2); \quad (10.119)$$

$$I \Psi_{ij} \dot{\xi}_{yi}^2 \leq a_i g \frac{l_{mi}^2}{s_i} \quad (i = 2; j = 1, 2). \quad (10.120)$$

где a_i — параметры, определяемые экспериментально; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; n — коэффициент восстановления при ударе поршня пневмопривода при подходе к жесткому упору; Δs_i — безразмерный параметр, определяемый заданной точностью позиционирования; $\Delta s_i = \Delta s_i$; Δ — заданная точность позиционирования; $\chi_{ij} = P_{ij} P_n F$; P_{ij} — сумма проекций всех внешних сил (кроме сил давления воздуха на поршень пневмоцилиндра), действующих на движущуюся часть системы после отскока ее от жесткого упора.

При выполнении соотношений (10.117) и (10.118) будет обеспечена практически безударная остановка каждого из звеньев манипулятора, а при выполнении соотношений (10.119) и (10.120) будет обеспечено практически плавное начало торможения.

В случае ускоренного движения:

$$\sqrt{D_{ij}^2 - \left[D_{ij}^2 - \frac{2\xi_n (1 - \sigma_n - \chi_{ij})}{N_{ij}^2} \right]} e^{-2\Psi_{ij}(1-\xi_n)} \leq$$

$$\leq \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta s_i (1 - \sigma_n - \chi_{ij}^*)}}{nN_{ij}} \quad (i = 1, 3; j = 1, 2);$$

$$\sqrt{D_{ij}^2 - \left[D_{ij}^2 - \frac{2\xi_n I (1 - \sigma_n - \chi_{ij})}{N_{ij}^2} \right]} e^{-2\Psi_{ij} I (1-\xi_n)} \leq$$

$$\leq \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta s_i \cdot I (1 - \sigma_n - \chi_{ij}^*)}}{nN_{ij}} \quad (i = 2; j = 1, 2);$$

$$\left| \frac{1}{N_{ij}} (1 - \sigma_n - \chi_{ij}) - \Psi_{ij} \dot{\xi}_n^2 \right| \leq a_i g \frac{l_{mi}^2}{s_i};$$

$$\left| \frac{I}{N_{ij}} (1 - \sigma_n - \chi_{ij}) - I \Psi_{ij} \dot{\xi}_n^2 \right| \leq a_i g \frac{l_{mi}^2}{s_i}.$$

Численное решение рассмотренной выше задачи проведено с использованием приближенных методов.

При этом исходными данными являются:

массы всех звеньев манипулятора и переносимого груза (кг) ($m_1 = 4$, $m_2 = 3$, $m_3 = 1,7$, $m_4 = 0,3$);

диаметр (мм) поршней и штоков пневмоцилиндров ($d_1 = 60$; $d_2 = 50$; $d_3 = 40$; $d_{1ш} = 38$; $d_{2ш} = 0$; $d_{3ш} = 25$);

диаметры соответственно поршней и штоков гидроамортизаторов ($d_{a1} = d_{a2} = d_{a3} = 28$ мм; $d_{a1ш} = d_{a2ш} = d_{a3ш} = 16$ мм);

диаметры входного и выходного отверстий пневмоцилиндров равны между собой ($f_1 = f_2 = f = 3$ мм);

диаметры сливных отверстий гидроцилиндра ($da_1 = da_2 = 6$ мм);

одно из сливных отверстий работает как клапан, второе можно уменьшать с помощью конической иглы, диаметр которой обозначим d_2 ;

плотность жидкости в гидроцилиндре $\gamma = 900$ кг/м³;

рабочий ход поршня каждого из пневмоприводов $s_1 = 0,1$ м, $s_2 = 0,12$ м.

$s_3 = 0,2$ м;

температура окружающей среды $t = 17^\circ\text{C}$;

радиус зубчатого колеса $r = 22$ мм;

магистральное давление (p_m) можно увеличивать до $4 \cdot 10^5$ Па;

точность позиционирования $\Delta = 0,1$ мм.

Экспериментально определяются:

коэффициенты расхода подводящей и выхлопной линий пневмоприводов $\mu_1 = 0,2$, $\mu_2 = 0,2$, $\mu_3 = 0,4$;

коэффициент расхода в гидротормозе $\xi = 2,2$;

радиус инерции вращающейся части манипулятора $\rho = 0,048$ м.

Приближенные формулы для определения сил трения в уплотнениях поршня и штока пневмоприводов [16]:

$$F_{\text{тр}1} = 0,1 p_m F, \quad F_{\text{тр}2} = F_{\text{тр}3} = 0,25 p_m F;$$

коэффициент восстановления при ударе $n = 0,4$;

коэффициенты, обеспечивающие плавное начало торможения, $a_1 = 0,05$, $a_2 = 0,2$, $a_3 = 0,8$.

На основании численного решения задачи построены графики зависимости времени рабочего хода Σt всех звеньев ПР от параметров ξ_n , p_m , d_2 (рис. 10.16, а, б, в — для $p_m = 2 \cdot 10^5$ Па, рис. 10.16, г, д, е — для $p_m = 3 \cdot 10^5$ Па, рис. 10.16, ж, з, и — для $p_m = 4 \cdot 10^5$ Па соответственно для первого, второго и третьего звеньев).

Из этих графиков следует, что наибольшее быстроедействие при заданной точности позиционирования обеспечивается при следующих значениях искомых параметров:

для 1-го звена $p_m = 3 \cdot 10^5$ Па, $d_2 = 0,001$ м, $\xi_n = 0,7$ ($\tau_1 = 6,46$);

для 2-го звена $p_m = 4 \cdot 10^5$ Па, $d_2 = 0,001$ м, $\xi_n = 0,85$ ($\tau_2 = 5,33$);

для 3-го звена $p_m = 2 \cdot 10^5$, $d_2 = 0,001$ м, $\xi_n = 0,75$ ($\tau_3 = 16,2$).

Таким образом, реальное оптимальное время рабочего хода ПР будет равно

$$t = \tau_1 t_{m1} + \tau_2 t_{m2} + \tau_3 t_{m3} = 4с.$$

Приведенное выше решение задачи относится к случаю раздельных движений звеньев манипулятора.

Целесообразно также исследовать, существенно ли уменьшится время рабочего хода ПР в случае одновременного движения части его звеньев (в рассматриваемой задаче — в случае одновременного движения двух звеньев манипулятора).

При одновременных движениях звеньев манипулятора приводы не разделяются на последовательно включаемые. В каждый момент времени работают приводы всех звеньев или группы звеньев манипулятора.

Анализ уравнения Лагранжа II рода для ПР-4 позволил сделать следующие выводы. В случаях, когда одновременно совершают движения 1-е и 2-е

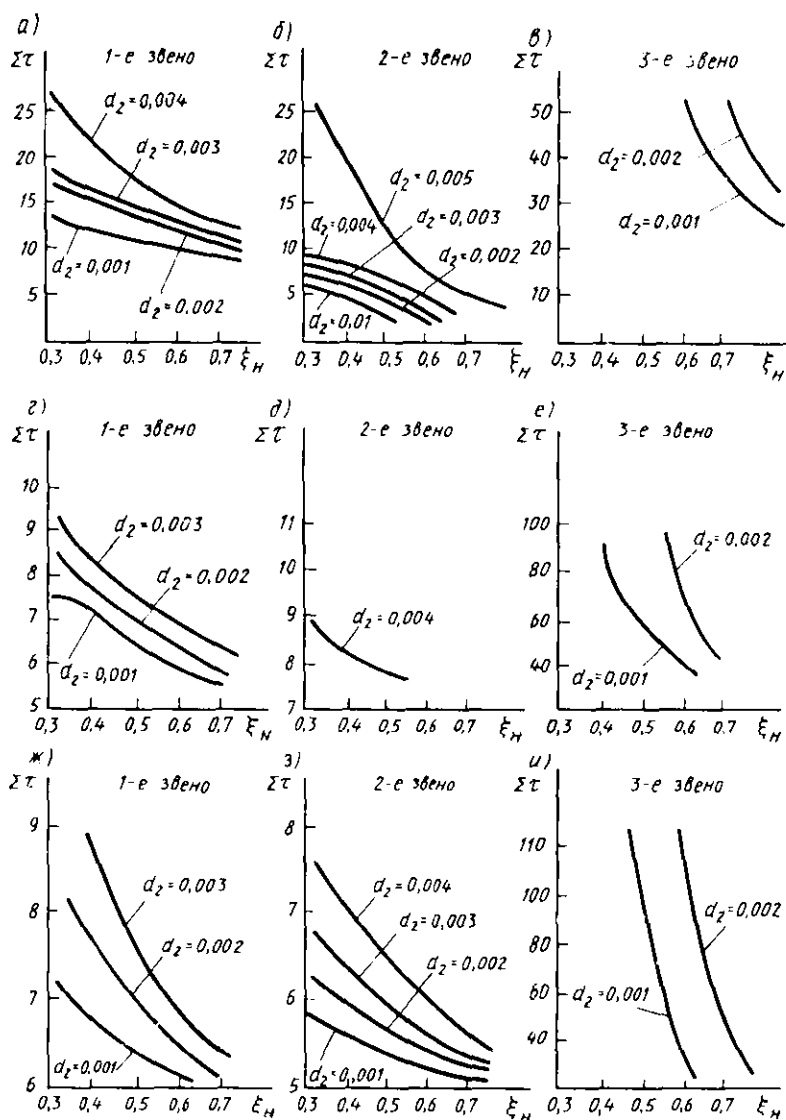


Рис. 10.16. Зависимость времени рабочего хода $\Sigma\tau$ всех звеньев ПР от параметров ξ_H , p_H , d_2 :

а - при $p_H = 2$ атм; б - при $p_H = 3$ атм; в - при $p_H = 4$ атм

звенья, а также 1-е и 3-е, система дифференциальных уравнений движения распадается на три динамически независимые дифференциальные уравнения и имеет такой же вид, как и в случае раздельных движений всех звеньев.

Таким образом, используя результаты численного решения выше поставленной задачи (при раздельных движениях звеньев манипулятора), можно определить оптимальное время рабочего хода ПР (t) в случае, когда вначале отработает пневмопривод 3-го звена, а затем начнут одновременно работать пневмоприводы 1-го и 2-го звеньев:

$$t = t_3 + \max(t_1, t_2) = 0,36 + 2,55 = 2,91 \text{ с.}$$

Из сравнения найденного времени рабочего хода ПР при одновременном движении 1-го и 2-го звеньев со временем, соответствующим раздельным движениям всех звеньев манипулятора, следует, что в случае одновременного движения 1-го и 2-го звеньев время рабочего хода ПР уменьшается примерно на 27 %.

В заключение следует отметить, что повысить производительность промышленного робота с пневмоприводом можно прежде всего путем оптимального выбора магистрального давления, тормозного пути и величины площади сливного отверстия гидротормоза (выбор оптимальных параметров ПР). Следующим этапом повышения производительности ПР после выбора оптимальных параметров является реализация совместных движений части тех звеньев манипулятора, движения которых являются динамически независимыми.

Глава 11

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ

§ 11.1. ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАК ОДИН ИЗ ВАЖНЕЙШИХ РЕГУЛЯТОРОВ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Контрольные операции являются своеобразными и вместе с тем ответственными этапами любого технологического процесса. Контроль может иметь разнообразные формы, однако во всех случаях его основное назначение состоит в том, чтобы непрерывно или периодически корректировать (регулировать) технологический процесс, иначе говоря, устранять возникающие в последнем отклонения от установленной нормы его отдельных характеристик или параметров, что иногда может выражаться выходом бракованных деталей. Это регулирование может осуществляться самыми разнообразными средствами, начиная от ручного контроля и кончая высокопроизводительными автоматическими контрольными устройствами.

Рабочая машина-автомат, снабжена автоматическим регулированием, приобретает новые особенности, позволяющие решить много важных задач, характерных для современного машиностроительного производства. К ним в первую очередь относятся:

а) исключение или уменьшение влияния времени, затрачиваемого на контроль, на длительность изготовления или обработки деталей;

б) достижение необходимой высокой точности обрабатываемых деталей;

в) упрощение конструкций и кинематики машины-автомата путем упразднения ряда звеньев, которые становятся излишними при введении управления движением по сигналам контрольных органов;

г) значительное снижение вероятности выхода бракованной продукции благодаря профилактической роли автоматического контроля.

Так, например, должен работать автомат, у которого контролируются не только конечные размеры изделия, но и состояние режущего инструмента (поломка, износ), усилие и скорость резания, наличие охлаждения, смазки и пр., причем на все возможные отклонения автомат реагирует, сам приводит их к норме и, кроме того, устанавливает оптимальные (наивыгоднейшие) режимы для процессов обработки. За человеком сохраняется только наблюдение за его работой по показаниям соответствующих приборов (сигнальные табло, звуковые сигналы, дисплей и т. д.) и принятие должных мер в аварийных случаях.

Известно, что контрольные автоматы, основанные на чисто механических принципах контроля и сортировки, существуют уже давно. Они применяются для наиболее простых и в то же время наиболее массовых деталей, таких, как ролики и шарики. Автоматизация контроля приняла особенно широкий размах с того времени, как началось применение электронных приборов, показавших свои неисчерпаемые и разнообразные возможности в деле разрешения насущных вопросов производства. Раньше всего появились шлифовальные станки, оснащенные «активными» контрольными устройствами, измеряющими размер изделия непосредственно во время обработки и подающими в нужный момент сигнал об окончании обработки.

Совершенно немыслима правильная работа рабочего агрегата, если в его органах регулирования не принимает участия основной показатель его работы — параметры создаваемого им продукта.

Работе машины-автомата обычно сопутствует не только контроль создаваемого ею продукта, но и другие виды активного контроля, назначением которых является поддержание в нужных пределах (регулирование) параметров отдельных ее элементов. К таким параметрам, например, относятся регуляторы или стабилизаторы напряжения, регуляторы скорости, давления, температуры, защитные реле и пр.

У любой рабочей машины существует некоторый, характеризующий ее параметр, выражаемый в единицах времени и определяемый величиной промежутка времени, протекшего от момента выхода из допустимых пределов выпускаемого ею продукта до момента исполнения ею регулирующего сигнала от контрольного пункта или органа. Упомянутый параметр, ниже условно называемый «периодом регулирования», складывается из следующих основных составляющих периодов:

t_1 — время перемещения продукта от рабочей машины до контрольного пункта или органа;

t_2 — время от начала контрольного процесса до окончательного оформления регулирующего сигнала;

t_3 — время движения регулирующего сигнала от контрольного пункта или органа до исполнительного органа машины;

t_4 — время исполнения рабочей машиной регулирующего сигнала.

Сумма указанных величин образует период регулирования T :

$$T = \sum_{i=1}^4 t_i. \quad (11.1)$$

Период регулирования T имеет место при обработке изделий на любом металлорежущем станке, разница может быть только в значении величины T и составляющих ее элементов.

Рассмотрим пример.

Обработка изделия на кулачковом автомате.

t_1 — время, в течение которого вышедшее из автомата изделие транспортируется к месту контроля;

t_2 — время измерения изделия и выявления наличия недопустимого отклонения в одном из размеров;

t_3 — время, необходимое на информирование наладчика об обнаружении отклонения в размере;

t_4 — время, затрачиваемое наладчиком на корректировку положения режущего инструмента.

Если выпуск детали носит массовый характер, а время обработки ее обычно сводится к минимуму, период регулирования T нуждается в сокращении путем автоматизации. При этом имеется возможность влиять на каждую из составляющих периода T следующим способом:

а) приближая место контроля к месту обработки и ускоряя поступление к нему деталей, уменьшать величину t_1 ;

б) вводя автоматическое контрольное устройство (сигнальный прибор, контрольно-сортировочный автомат и т. д.), уменьшать величину t_2 ;

в) совершенствуя способ передачи сведений о размерах детали с контрольного пункта к наладчику, сокращать величину t_3 ;

г) повышая квалификацию наладчика, сокращать величину t_4 .

В автоматических копировальных станках величины всех четырех составляющих периода регулирования T благодаря автоматизации каждой из них сведены к минимуму. Здесь период T может составлять ничтожные доли секунды. Такая система управления процессом известна под названием *следающей системы*.

Следающую систему мы можем рассматривать, как высокоавтоматизированную форму управления работой машины с помощью контрольного органа (автоматическое регулирование). В настоящее время непрерывно растет количество автоматически управляемых приборов и устройств, разрешающих труднейшие технические задачи только в результате применения в них следающих систем.

Среди различных форм автоматического контроля особый характер носит автоматическая сортировка изделий на группы по диапазонам допуска на определенный параметр. Для них характерно значение $t_a \rightarrow \infty$. Это означает, что данные устройства не могут рассматриваться как автоматические регуляторы работы машины. Их скорее следует рассматривать как своего рода самостоятельные машины-автоматы, играющие роль дополнительных устройств, завершающих «обработку» изделий, сходящих с основной машины-автомата.

Сказанное легче всего разъясняется следующим образом. Представим себе некоторый весьма точный автомат, выпускающий цилиндрические ролики с допуском на диаметр, равный d . Допустим, что по условиям сборки требуется, чтобы допуск на этот ролик составлял величину не более d/n , где n — целое положительное число. Иначе говоря, требуется выдержать допуск, который ни упомянутый автомат и ни какой другой из существующих автоматов разрешить не может. В этом случае остается один выход: из общей массы роликов, выпускаемых автоматом в пределах допуска, отобрать такие, которые случайно вошли в допуск, равный требуемому d/n . Этой задаче в сущности и отвечает сортировочный автомат, а поступающие в него детали являются как бы полупродуктом, который «перерабатывается» в детали с нужным допуском. По условиям селекционной сборки сортировочный автомат разбивает все детали на определенное число групп по диапазонам допуска и каждой такой группе соответствует должная группа спариваемой детали.

Эта форма автоматического контроля будет существовать до тех пор, пока развитие средств активного автоматического контроля не обеспечит осуществления нужной точности работы производящих машин.

Современная промышленность обладает большим количеством средств повышения производительности и качества контрольных операций, конечная цель которых — предупреждение возможности выхода бракованного продукта (профилактика). В связи с этим необходимо иметь в виду, что наряду с автоматизацией технического контроля широкое развитие получили статистические методы автоматического контроля качества продукции.

Оба указанных вида контроля являются не исключающими, а наоборот, дополняющими друг друга способами профилактики брака, имеют свои достаточно четко ограниченные области применения, определяемые некоторыми параметрами, характеризующими данный технологический процесс.

Для уяснения этого вопроса обратимся к рис. 11.1, на котором схематически изображены три наиболее характерных практически встречающихся соотношения между величиной допуска, в пределах которого следует выдержать параметр обрабатываемого изделия, и точностными показателями рабочей машины (металлообрабатывающего станка). Как известно, точностные показатели любой рабочей машины устанавливают на основании данных статистического анализа ее ра-

боты. Например, этот анализ позволяет выявить среднее квадратическое значение (σ_h) отклонения параметра обработанных изделий от среднего значения, а также положение и характер перемещения в процессе обработки центра группирования кривой (чаще всего нормального распределения значений указанных параметров P), при этом точность рабочей машины характеризует величина, равная $6\sigma_h$.

Рис. 11.1, а соответствует условию, при котором

$$d > 6\sigma_h, \quad (11.2)$$

где d — допуск, в пределах которого должен быть выдержан параметр изделия в результате обработки.

Рис. 11.1, б соответствует условию, при котором

$$4\sigma_h < d < 6\sigma_h, \quad (11.3)$$

и, наконец, рис. 11.1, в соответствует условию

$$d < 2\sigma_h. \quad (11.4)$$

Рассмотрим более детально каждый из приведенных случаев.

В случае, показанном на рис. 11.1, а, всегда имеет место некоторый закон перемещения центра группирования значений параметра P обработанных изделий (линия $A-D$ на рис. 11.1, а). Это перемещение является результатом действия определенных постоянных факторов (например, износ режущего инструмента).

Наличие условия (11.2), а также закономерность перемещения центра группирования в функции времени

$$\delta = f(t) \quad (11.5)$$

позволяет путем периодического взятия проб следить за изменением параметра P и соответственным образом корректировать процесс обработки. Как известно, в этом и заключаются задачи статистического контроля качества продукции. Подобные же задачи разрешаются и с помощью средств активного автоматического контроля, в частности с помощью автоматических подналадчиков.

Покажем, при каких обстоятельствах становится целесообразным применение того или иного метода корректировки технологического процесса.

Введем следующие обозначения:

T_n — период, в течение которого данная рабочая машина может работать без корректировки положения обрабатывающего инструмента;

T_h — периодичность взятия проб в целях измерения обрабатываемых изделий, сходящих с данной рабочей машины;

T — период регулирования рабочей машины [см. (11.1)].

Очевидно, что упомянутые величины должны устанавливаться заводской администрацией на определенном уровне, соответствующем рентабельности данного вида технологического процесса. Допустим, например, что в случае обработки изделий на токарном автомате T_n

не должно быть ниже 4, а T_k соответственно 1 ч. Допустим, что на основании данных статистического анализа выявлено, что начиная от момента корректировки точность рабочей машины изменяется по закону

$$3\sigma = f_2(t). \quad (11.6)$$

Тогда на основании рис. 11.1, а нетрудно установить зависимость

$$3\sigma_0 \leq d_2 - f_1(T_n) - f_2(T_k), \quad (11.7)$$

где $3\sigma_0$ — начальное значение точности обработки при $t = 0$ в выражении (11.6); d_2 — установленное поле между контрольными пределами для данного изделия.

Выражение (11.7) является одним из критериев, по которому надлежит выбрать способ корректировки процесса работы данной машины.

Для установления другого критерия следует исходить из необходимости гарантировать невозможность выхода обрабатываемого параметра P за пределы допуска d в течение промежутка времени, складывающегося из периодов T_n и T_k .

Как следует из рис. 11.1, а, этому условию должна удовлетворять зависимость

$$3\sigma_0 \leq d_1 + d_2 - f_1(T_n) - f_2(T_k + T), \quad (11.8)$$

где d_1 — расстояние между верхней контрольной границей и верхним пределом допуска.

Итак, мы можем констатировать, что если в условиях массового и крупносерийного производства выражения (11.7) и (11.8) удовлетворяются, то имеются все основания к применению статистического метода контроля качества продукции на данной технологической операции.

Далее, если выражение (11.7) удовлетворяется, а выражение (11.8) не удовлетворяется, то надлежит в первую очередь попытаться увеличить значение правой части выражения (11.8). Для этого необходимо, очевидно, пойти по пути механизации или автоматизации математиче-

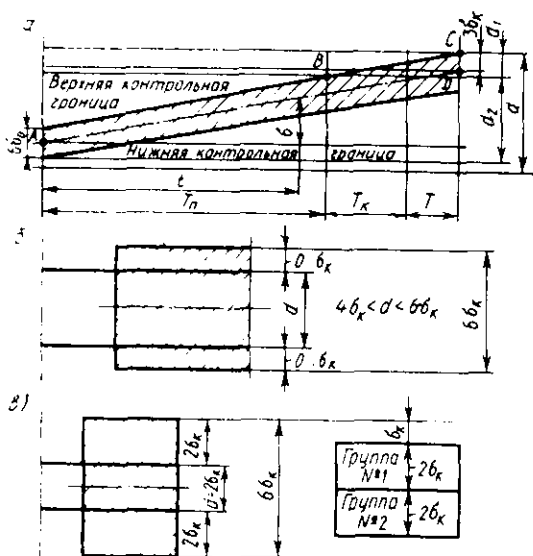


Рис. 11.1. Характерные соотношения между допуском на размер и точностными показателями металлообрабатывающего станка

ской обработки результатов взятия проб, что должно снизить величину периода регулирования T за счет уменьшения его составляющей t_2 .

Улучшая внутризаводскую связь, рационализируя способ корректировки рабочей машины, приближая место контроля к рабочему месту, можно сократить величину T за счет остальных составляющих. Если возможности сокращения T оказываются исчерпанными, пытаются пойти по линии уменьшения T_k . При этих обстоятельствах целесообразно ввести автоматизацию статистического контроля путем использования соответствующих вычислительных устройств с выходом команды на управление.

Если оба выражения (11.7) и (11.8) не удовлетворяются, несмотря на принятие всех возможных мер по изменению входящих в них членов, включая и величины $3\sigma_0$, характеризующую точность рабочей машины, то только тогда становится рациональным и рентабельным применение активного автоматического контроля в виде автоматического подналадчика.

Анализируя далее выражения (11.7) и (11.8), можно прийти к выводу, что при известных обстоятельствах применение активного автоматического контроля оказывается технически невозможным и бессмысленным. Прежде всего заметим, что при применении автоматического подналадчика величина T_n не допускает беспредельного уменьшения и должна быть такой, чтобы в течение промежутка времени, необходимого для обработки одного изделия, центр группирования значений обрабатываемого параметра не мог переместиться более чем на некоторую величину d_0 (допуск на колебание параметра обычно меньше допуска на его величину), т. е. необходимо выдержать условие

$$d_0 \leq f_1(T_n). \quad (11.9)$$

Что касается величины T , то все его составляющие, за исключением t_1 , стремятся к весьма малому значению. Ввиду изложенного выражение (11.8) приобретает вид

$$3\sigma_n \leq d_1 + d_2 + f_1(T_n - t_1) + f_2(t_k + t_1), \quad (11.10)$$

где t_1 — время перемещения изделия от места обработки к месту контроля.

Отсюда следует, что при необходимости уменьшить значения d_1 и d_2 , т. е. в конечном итоге ужесточить допуск на обрабатываемый параметр, возникает опасность нарушения неравенств (11.7) и (11.8). Этого можно избежать только путем доведения до весьма малых значений t_1 и T_n , что равносильно введению активного автоматического контроля с автоматическим отводом инструмента от каждого изделия в момент окончания обработки.

Мы подходим, следовательно, к изображенному на рис. 11.1, б случаю, при котором автоматическая подналадка либо невозможна, либо требует повышения точности рабочей машины (снижения $3\sigma_0$).

Если на данном уровне развития технологии и конструирования невозможно рациональным образом достичь снижения $3\sigma_0$, то следует

признать целесообразным при наличии случая, показанного на рис. 11.1, б, применить 100%-ный контроль изделий после обработки, используя для этих целей *автоматическую разбраковку*.

Как следует из законов теории вероятностей, при нормальном распределении число изделий, размер которых отклоняется от центра группирования на величину порядка $2\sigma_d$, составляет 4,56 % от общего числа изделий. Этому случаю соответствует рис. 11.1, б, подтверждающий рациональность применения автоматического браковочного устройства.

Изображенный на рис. 11.1, в случай характеризуется резкой разницей между требуемой величиной допуска на обрабатываемый параметр и точностью, которую дает данная рабочая машина. Согласно законам теории вероятностей, число изделий, не попавших в пределы допуска, в случае рис. 11.1, в доходит до 32 %. Это означает, что применение разбраковки изделий после обработки здесь уже нельзя признать рациональным, так как чрезмерно большое количество изделий должно оказаться негодным. В таких случаях широкое применение находит селекционная сборка и, следовательно, изделия подлежат автоматической *многодиапазонной сортировке*. На рис. 11.1, в дан пример сортировки на две группы (1 и 2), удобный для конкретного случая, когда $d \approx 2\sigma_d$. Итак, мы видим, что внедрение автоматических и статистических методов контроля качества продукции должно основываться на предварительном анализе технологических процессов.

По мере развития и совершенствования технологии обработки, повышения точности и производительности рабочих машин роль активного автоматического контроля и автоматической многодиапазонной сортировки будет непрерывно расширяться.

Гибкие производственные системы (ГПС) существенно расширяют круг задач, которые должны выполнять средства автоматического контроля. Кроме автоматизации контроля деталей по размерным параметрам надлежит решать контроль линейных перемещений, величина которых может составлять от миллиметра до десятков и сотен миллиметров, и контроль угловых перемещений, а также контроль ряда физических параметров (например, температур, вибраций и деформаций в заданных точках технологического оборудования).

В условиях ГПС следует различать два основных направления использования автоматического контроля: 1) контроль при функционировании производственной системы; 2) контроль при диагностировании системы.

Контроль при функционировании должен решать главным образом следующие задачи:

а) контроль обрабатываемых деталей по размерам, геометрической форме, шероховатости поверхности, твердости и т. д.;

б) контроль металлообрабатывающих станков-автоматов и автоматических линий (сюда относятся такие вопросы, как работа, простои и их причина, наличие заготовки или детали и точность ее установки, наличие режущего инструмента, точность его установки и степень изно-

са; усилие зажима детали в патроне, спутнике и т. д.; исходное состояние рабочих органов; давление в гидросистеме; параметры резания; температурные режимы; вибрации);

в) контроль работы промышленных роботов по точности позиционирования деталей, наличие схватов и усилие зажима ими детали;

г) контроль правильности работы системы автоматического управления, к которой, в частности, относятся микропроцессоры, мини- и микроЭВМ, наличие их связи с объектами управления, время прохождения команд и информации, ошибки преобразования информации, наличие помехоустойчивости сигналов датчиков и т. д. (особое значение имеет решение задачи автоматического активного контроля деталей при обработке на станках с числовым программным управлением);

д) автоматический контроль состояния складских устройств, грузочных устройств и транспортирующих роботов.

Диагностирование состояния оборудования в гибких производствах и его своевременная коррекция имеет большое значение для поддержания нормального хода управления качеством и производительностью.

Укажем на некоторые примеры диагностического контроля:

- наличие инструмента и его своевременная смена;
- параметры цепей питания (электрических, гидравлических);
- наличие и состояние смазки и охлаждения (СОЖ);
- расход охлаждающей жидкости;
- выдерживание норм точности станков-автоматов и точности перемещения рабочих органов (позиционирование);
- точность распознавания образов промышленным роботом;
- динамические характеристики промышленных роботов (скорость, ускорение звеньев, состояние захватов и пр.).

Следует отметить важность вопросов диагностики на станках с числовым программным управлением, к которым относятся зажимные устройства, положение переднего и заднего центров, чистота базовых поверхностей зажимных устройств, удаление стружки, поломка и размерный износ инструмента, коррекция режимов резания, наличие СОЖ и т. д.

Важной проблемой, решение которой должно обеспечить высокую точность обработки на станках с ЧПУ, является автоматизация контроля размеров деталей в процессе обработки (активный автоматический контроль).

§ 11.2. МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ

Специфической особенностью техники автоматического контроля и сортировки изделий по геометрическим или физическим параметрам является необходимость широкого применения средств электроавтоматики, особенно электронной техники, в сочетании с новейшими до-

стижениями метрологии, пневматики, гидравлики, оптики, механики и микропроцессорной техники.

Любое автоматическое контрольно-сортировочное устройство в самом общем виде представляет собой электроавтоматическую систему, строящуюся в соответствии с законами и правилами техники автоматического регулирования. В нем существуют общезвестные звенья и связи, работа которых описывается соответствующими дифференциальными уравнениями и простыми уравнениями. Это обстоятельство позволяет в случае необходимости использовать упомянутые уравнения при конструировании и построении этих устройств.

Электроавтоматические контрольно-сортировочные системы имеют и свои отличительные особенности, заключающиеся в наличии у них специфических дискретных звеньев, создающих скачкообразное изменение выходной величины при плавном изменении входной величины. В этом заключается усложнение рассматриваемых контрольно-сортировочных систем по сравнению с обычно применяемыми системами непрерывного (плавного) регулирования. Вместе с тем при построении электроавтоматических контрольно-сортировочных систем имеет место облегчающее обстоятельство, заключающееся в возможности искусственно затягивать процесс изменения входной величины и тем самым в любой степени приблизить зависимость между входными и выходными параметрами системы к установившемуся режиму.

Для каждого автоматического контрольно-сортировочного устройства характерно наличие повторяющегося через определенные интервалы времени «измерительного периода», во время которого контролируемое изделие или объект непрерывно воздействует на электроавтоматическую контрольную систему. Исполнительный орган устройства, представляющий собой конечное (выходное) звено системы, должен при этом принять вполне определенное состояние, которое в общем случае наступает по прошествии некоторого промежутка времени после окончания измерительного периода и длится также вполне определенный промежуток времени.

Любая электроавтоматическая контрольная система состоит из четырех главных составных органов, взаимодействующих друг с другом в соответствии с общей скелетной схемой, представленной на рис. 11.2.

Изображенный на рис. 11.2 первичный контрольный орган представляет собой совокупность определенным образом ориентированных относительно контролируемого объекта чувствительных приборов или датчиков (измерительных преобразователей), каждый из которых, реагируя на тот или иной контролируемый параметр, образует на своем выходе первичные командные импульсы, обычно электрические. Чувствительные элементы датчиков, на которые непосредственно воздействуют контролируемые параметры, образуют вход.

Выходные командные импульсы «первичного контрольного органа» поступают на вход промежуточного преобразователя импульсов, последний преобразует эти импульсы в новые, удобные для воздействия на «исполнительный орган».

Основная задача механической части состоит в выполнении вспомогательных механических перемещений, необходимых для совершения контрольно-сортировочного процесса. К ним в первую очередь относятся ввод контролируемого объекта на измерительную позицию, подвод к нему датчиков, проталкивание его к сортирующему исполнительному органу, управление вращением основного распределительного вала и т. д.

Среди практически осуществленных контрольно-сортировочных устройств наряду с системами одностороннего взаимодействия встречаются системы с обратными связями между:

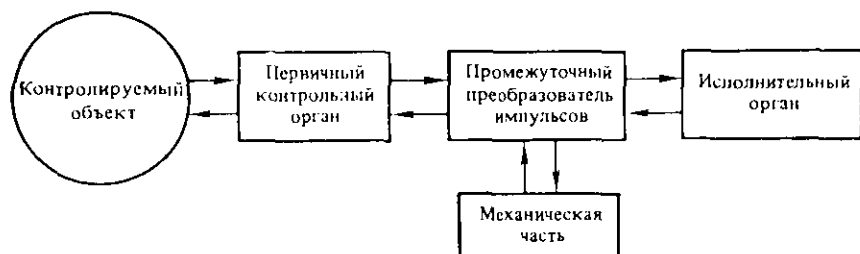


Рис. 11.2. Важнейшие органы преобразования контролируемой величины в сигналы управления исполнительным органом

а) первичным контрольным органом и промежуточным преобразователем импульсов;

б) входом и выходом промежуточного преобразователя импульсов;

в) промежуточным преобразователем импульсов и исполнительным органом;

г) выходом первичного контрольного органа и контролируемым параметром;

д) механической частью и промежуточным преобразователем импульсов;

е) механической частью и первичным контрольным органом.

Использование обратных связей позволяет в значительной мере расширить области применения средств электроавтоматического контроля. Установлено, что контроль преобладающего большинства негеометрических параметров (физических, химических), как правило, сводится к контролю линейных перемещений.

Во время измерительного периода ($t_{изм}$) контролируемый параметр P данного изделия в общем случае непрерывно изменяет свое значение по некоторой кривой (рис. 11.3). В качестве примера можно указать на контроль диаметра цилиндрической детали в процессе вращения. На том же рисунке двумя прямыми, параллельными оси абсцисс, ограничен допуск d на данный контролируемый параметр P ; параллельными линиями этот допуск разбит на i диапазонов, каждый из которых помечен соответствующим номером. Число диапазонов равно числу установленных сортировочных групп для данного объек-

та. Через $P_{\text{н}}$ условно обозначено нижнее предельное значение контролируемой детали. Очевидно, что общее число групп с учетом случаев захода параметра P за пределы допуска, должно равняться $i \cdot 2$.

Мы видим, что контролируемый параметр P во время измерительного периода изменяется (колеблется) в пределах двух крайних значений $P_{\text{д}}$ и $P_{\text{д}}''$.

Максимальное или минимальное значение $P_{\text{н}}$ для контролируемого параметра P , на основании которого определяется сортировочная группа и к которой надлежит отнести данное контролируемое изделие, мы будем называть *доминирующим значением*. В этом заключается смысл сортировки по диапазонам допуска. Следует различать еще рассортировку на группы по классам точности.

Номер группы при сортировке по классам точности определяется максимальной величиной колебания некоторого параметра объекта, независимо от абсолютного значения последнего.

Исходя из изложенного операции контроля после обработки разбиваются на четыре типа по следующим признакам.

1-й тип контроля. Установление номера сортировочной группы, к которой следует отнести доминирующее значение контролируемого размера.

Условием пребывания контролируемого параметра в пределах сортировочной группы Nm служит выражение

$$P_{\text{н}} + \sum_{k=1}^i \sum_{i=1}^m \Delta P_k \leq P_{\text{д}} \leq P_{\text{н}} + \sum_{k=1}^i \sum_{i=1}^m \Delta P_k, \quad (11.11)$$

где $P_{\text{д}}$ — доминирующее значение контролируемого параметра; $P_{\text{н}}$ — нижнее допустимое предельное значение контролируемого параметра; ΔP_k — диапазон значений $P_{\text{д}}$, соответствующий сортировочной группе; i — число сортировочных групп, укладывающихся в пределах общего допуска на контролируемый параметр.

Выражение (11.11) учитывает, что сортировочные группы принято нумеровать в порядке уменьшения значения $P_{\text{д}}$.

В случае, когда $P < P_{\text{н}}$, сортировочная группа получает наименование группы « $\leq$ », в случае, когда

$$P > P_{\text{н}} + \sum_{k=1}^i \sum_{i=1}^m \Delta P_k,$$

она получает наименование группы « $>$ ».

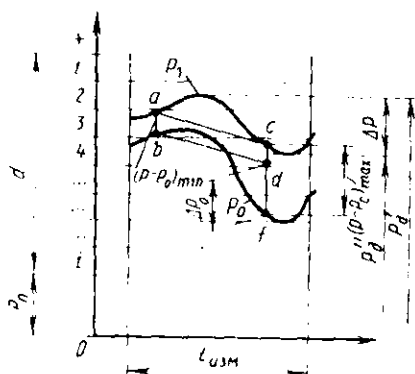


Рис. 11.3. Сущность четырех основных типов контрольных операций

Примером контроля первого типа может служить контроль линейного размера детали.

В частном случае, когда $i = 1$, происходит сортировка на брак и годные (браковочный процесс).

2-й тип контроля. Контроль величины ΔP колебания параметра P .

Особенностью данного типа контроля является независимость контролируемого параметра (ΔP) от величины параметра P .

Согласно рис. 11.3 значение ΔP численно равно $\Delta P = P'_d - P''_d$. В данном случае каждая сортировочная группа характеризуется определенным допуском $\Delta P'_m$ на колебание параметра P .

Если допустить, что между номером сортировочной группы и соответствующим ей допуском $\Delta P'_m$ существует зависимость $\Delta P'_m = f(m)$, где m — номер сортировочной группы, то при наличии i сортировочных групп контролируемый объект может быть отнесен к группе Nm при существовании условия

$$f(m-1) \leq \Delta P \leq f(m). \quad (11.12)$$

Здесь порядковый номер сортировочной группы принято считать возрастающим с возрастанием величины ΔP .

В частном случае, когда для годных деталей предусматривается только одна группа (разбраковка), имеем $i = m = 1$.

Тогда выражение (11.12) принимает вид $\Delta P \leq \Delta P'_1$.

Примерами данного вида контроля служат контроль овальности, разнотолщинности, прямолинейности и т. д.

3-й тип контроля. Контроль разности $P - P_0$ двух параметров.

Нередко в процессе контроля необходимо сравнивать два изменяющихся (колеблющихся) параметра P и P_0 , характерных для данного контролируемого объекта (см. кривую P_0 на рис. 11.3). Обычно это сравнение сводится к установлению максимальной разности $(P - P_0)_{\max}$, образующейся во время измерительного периода.

Здесь мы имеем, подобно первому типу контроля, процесс сортировки по диапазонам допуска на разность $(P - P_0)$, согласно условию

$$\Delta P_{\min} + \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{m-1} \Delta P_h \leq (P - P_0)_{\max} \leq \Delta P_{\min} + \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^m \Delta P_h, \quad (11.13)$$

где $\Delta P_{\min}$ — допустимое нижнее предельное значение разности $P - P_0$.

При наличии условия (11.13) данный контролируемый объект может быть отнесен к группе Nm .

Заметим, что величина ΔP_0 , как и $P - P_0$, может принимать значения не только равные нулю, но и отрицательные. Далее, для доминирующего значения $(P - P_0)$ может быть установлено не только максимальное, но и минимальное значение. В качестве примера такого ви-

да контроля можно указать на контроль конусности с рассортировкой на группы по диапазонам допуска на конусность.

4-й тип контроля. Контроль величины колебания ΔP_0 разности двух параметров.

Подобно второму типу контроля здесь также возможна сортировка на группы по классам точности.

Если допустить, что между номером сортировочной группы m и соответствующим ей допуском $\Delta P_{от}$ на колебание разности $(P - P_0) \rightarrow (P - P_0)_{мин}$ существует зависимость $\Delta P_{от} = f_0(m)$, то при наличии i сортировочных групп данная деталь может быть отнесена к группе Nm при существовании условия

$$f_0(m-1) \leq \Delta P_0 \leq f_0(m), \quad (11.14)$$

где ΔP_0 — фактическая максимальная разность между величинами P и P_0 .

Примером рассматриваемого типа контроля может служить контроль соосности, взаимного биения поверхностей и т. д.

В частном случае, при $i = m = 1$, выражение (11.14) приобретает вид $\Delta P_0 \leq \Delta P_{от}$.

Из рис. 11.3 можно уяснить, что колебание разности двух параметров определяется как разность fd между максимальным (отрезок cf) и минимальным (отрезок ab) расстояниями между кривыми P и P_0 . Заметим еще, что автоматические контрольно-сортировочные устройства в зависимости от числа контролируемых ими параметров данного объекта разбиваются на *многомерные* и *одномерные*.

При активном автоматическом контроле мы также имеем дело с параметром P , изменяющим свое значение в процессе измерения, и поэтому с точки зрения методики построения электроавтоматической системы здесь имеется почти полная аналогия с пассивными системами. Основное отличие заключается в поведении исполнительного органа. Если в случае пассивного автоматического контроля исполнительный орган системы принимает (после окончания измерительного периода) только одно определенное положение или состояние, определяемое доминирующим значением контролируемого параметра, то в случае активного контроля каждый элемент исполнительного органа получает свое самостоятельное состояние по мере изменения контролируемого параметра.

При активном автоматическом контроле, подобном многодиапазонной сортировке, контролируемый параметр в процессе изменения своего значения проходит через определенные, заранее устанавливаемые зоны, для каждой из которых характерно определенное состояние исполнительного органа. Необходимо еще отметить, что в более сложных случаях, обычно встречающихся при контроле физических параметров, в состав первичного контрольного органа приходится вводить аппараты, управляющие созданием необходимого физического режима контроля для данного объекта, и автоматические регуляторы, поддерживающие этот режим в установленных пределах.

Итак, независимо от типа контрольной операции, на вход первичного контрольного органа электроавтоматической контрольной системы во время измерительного периода ($t_{изм}$) поступает в общем случае переменная геометрическая или физическая величина, на которую определенным образом должен реагировать исполнительный орган этой системы.

В состав подобных систем должны входить следующие звенья:

1. Звено, непосредственно связанное с контролируемым параметром $P_{вх}$. Как входная, так и выходная величины этого звена изменяются плавно, подчиняясь зависимости (в установившемся режиме)

$$P_1 = f_1(P_{вх}). \quad (11.15)$$

2. Звено, преобразующее плавно изменяющуюся входную величину P_1 [см. зависимость (11.15)] в скачкообразно изменяющуюся входную величину P_2 . Последняя может выражаться в определенных количественных значениях, например в числе замкнувшихся или разомкнувшихся электрических цепей, и, следовательно, может подчиняться следующей зависимости:

$$P_2 = j_2(P_1). \quad (11.16)$$

3. Звено, преобразующее скачкообразно изменяющуюся входную величину P_2 [см. зависимость (11.16)] в соответственные выходные командные сигналы, управляющие работой исполнительного органа. Здесь также может существовать определенная математическая зависимость, выражаемая либо числом замкнувшихся электрических цепей, либо номером замкнувшейся цепи, либо углом поворота ползуна некоторого коммутатора и т. д.

$$P_3 = f_3(P_2). \quad (11.17)$$

4. Исполнительное звено, состояние которого определяется входной величиной $P_{вх}$. И в данном случае возможно существование математической зависимости

$$P_{вых} = j_4(P_3), \quad (11.18)$$

поскольку выходная величина $P_{вых}$ может выражаться либо углом поворота сортирующего желоба, либо числом возникших световых сигналов и т. д.

В практических условиях изменения контролируемого параметра ($P_{вх}$) вследствие наличия электродинамических факторов приходится иметь дело с переходными процессами, порождающими соответствующие погрешности в работе звеньев.

Таким образом, наряду с существованием метрологических (статических) погрешностей должны существовать еще динамические погрешности, влияющие на точность работы электроавтоматических контрольно-сортировочных устройств.

При конструировании и эксплуатации средств измерения или контроля, первостепенное значение имеет показатель, получивший на-

менование *точность* или *погрешность*. В случае автоматического контроля, под погрешностью устройства понимают максимальную разность Δ_{lim} между действительным значением величины P и значением P_{max} некоторого предела, выше абсолютного значения которой данная величина P надежно отсортировывается этим устройством в ту сортировочную группу, в пределах которой эта величина фактически находится. Сказанное поясняет рис. 11.4. Нахождение контролируемой величины (т. е. данного параметра изделия) в пределах заштрихованного поля $\pm a$ может в зависимости от случайных обстоятельств привести к отсортировке изделия либо в группу Nm , либо в группу $N(m+1)$, при этом вероятность P_n отсортировки изделия в ту или иную группу изменяется в зависимости от действительной разности $P - P_m$: $P_n = f(P - P_m)$.

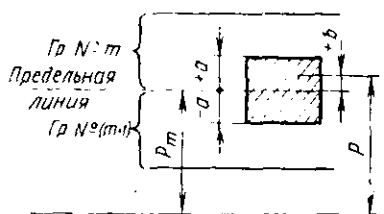


Рис. 11.4. Погрешности автоматической многодиапазонной сортировки

При $P - P_m > +a$ изделие надежно отсортировывается в группу Nm .

При $P - P_m < -a$ изделие надежно отсортировывается в группу $N(m+1)$.

При $P - P_m = 0$ отсортировка в ту или иную группу обычно равновероятна, т. е. $P_n = 0,5$.

Величину Δ_{lim} называют *предельной погрешностью*. Известно, что предельная погрешность обычно определяется рядом факторов, исследованию и изучению которых посвящено большое количество трудов отечественных и иностранных ученых.

Утроенная средняя квадратичная ошибка ($\pm 3\sigma$), полученная на основании математической обработки большого числа выполненных операций контроля на данном автоматическом устройстве, принята как величина, характеризующая предельную погрешность $\Delta_{\text{lim}} \pm 3\sigma$.

Практикой и исследованиями установлено, что погрешность автоматического контрольного устройства складывается из следующих трех основных составляющих погрешностей: а) погрешность настройки автоматического устройства; б) погрешность статическая; в) погрешность динамическая.

К статической погрешности относят погрешности, возникающие вследствие неточности изготовления автоматического устройства. Динамическая погрешность возникает главным образом при изменении значения контролируемого параметра в процессе измерения (т. е. во время измерительного периода), что может иметь место при всех четырех типах контроля, а также при наличии инерционных звеньев в преобразовательном тракте электроавтоматической системы, к которому относятся также звенья исполнительного органа.

§ 11.3. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Сигнальные устройства. Сигнальные устройства особенно эффективны в тех случаях, когда ими решается задача одновременного контроля детали по нескольким параметрам (многомерный автоматический контроль). На рис. 11.5 показана схема построения сигнального табло подобного типа контрольного устройства.

В устройствах, лишенных сортирующего органа, сигнализация приобретает важнейшую роль. Сущность сигнализации заключается в образовании исполнительным органом контролирующего устройства определенной информации, характер которой находится в зависимости от значения контролируемого параметра. Сигналы могут быть световыми, реже звуковыми. Для этих целей используются лампочки накаливания, лампы тлеющего разряда (неоновые) или различного рода светодиоды.

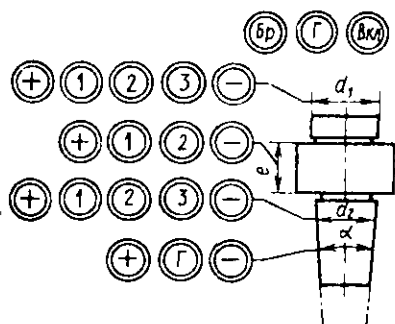


Рис. 11.5. Пример оформления сигнального табло

Как видно из рис. 11.5, каждому контролируемому параметру соответствует ряд горизонтально расположенных сигнальных элементов. От каждого ряда делается сноска (выносная линия) к условному обозначению контролируемого параметра, которому он соответствует. Количество сигналов в каждом горизонтальном ряду соответствует возможному числу сортировочных групп по данному параметру; крайние сигналы соответствуют завышенным (·) или заниженным (---) значениям параметров. В частных случаях число годных сортировочных групп по данному контролируемому размеру может равняться единице, когда сортировка сводится к разбраковке на «Брак +» и «Брак -».

Применение многомерных светосигнальных автоматических приборов удобно в серийных и даже мелкосерийных производствах с неполной или частичной автоматизацией процесса. Вместе с тем следует иметь в виду, что получившие в настоящее время развитие гибкие производственные системы (ГПС) предъявляют иные требования к светосигнальным контрольным приборам. Оснащать автоматические линии обычными светосигнальными приборами для периодического наблюдения за ходом производства становится нерентабельным, так как их число оказывается чрезмерно большим, и, кроме того, их перестройка на новый тип изделия становится практически невозможной. В этих случаях на смену светосигнальным приборам приходит «дисплей», которые по сути дела можно рассценивать как новый тип перестраиваемого сигнально-контрольного прибора, оформленного в виде электронно-лучевой трубки.

Наблюдая за показаниями дисплея, оператор имеет возможность в случае необходимости вносить быстрые исправления в ход процесса обработки, дабы исключить появление отклонения от допустимых размеров обрабатываемой детали. Дисплейный контроль стал возможным в результате использования микропроцессорной техники в измерительных и регулирующих процессах. Его использование в контрольно-управляющих процессах весьма перспективно, особенно если на экран дисплея кроме данных о линейных размерах деталей будут выводиться сведения, характеризующие технологические режимы обработки, как, например, износ режущего инструмента, температура в зоне резания, наличие охлаждающей эмульсии, сведения о вибрациях и пр., включая и рекомендации (советы) для оператора.

Во многих случаях автоматический контроль размера может быть эффективно использован для непосредственного управления процессом обработки. Иначе говоря, по достижении заданного размера процесс обработки детали автоматически прекращается. Такой автоматический контроль обычно называется *активным*, ибо он не только измеряет деталь, но и воздействует на процесс ее обработки. При активном автоматическом контроле обычно достигается высокая точность деталей (выдерживание размеров в заданном жестком допуске), несмотря на наличие ряда возмущающих воздействий, мешающих нормальному ходу обработки.

Обращаясь к рис. 11.1, можно сказать, что активный автоматический контроль целесообразен для изображенных там случаев (рис. 11.1, б, в) разброса размеров обработанных деталей.

Активный автоматический контроль, например, эффективен при управлении процессом круглого наружного шлифования деталей, схематически показанном на рис. 11.6. Распространенной формой измерительного устройства в таких случаях является электроизмерительная скоба 2, соприкасающаяся со шлифуемой деталью 1 по трем точкам (алмазные наконечники). Две из этих опорных точек неподвижны, а третья образована промежуточным штоком 3, верхний конец которого упирается в измерительный наконечник преобразователя (датчика) 4, с выхода которого снимается управляющий сигнал y . По мере перемещения круга 5 на деталь 1 последняя уменьшается в размере и заставляет шток 3 опускаться вниз.

Для данного вида активного контроля характерно плавное изменение контролируемого параметра в процессе шлифования. Длительность последнего определяется технологическими факторами и числен-

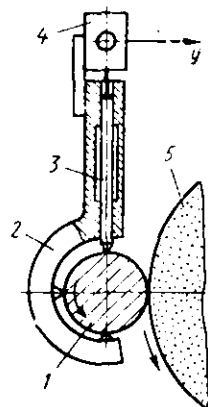


Рис. 11.6. Схема автоматического активного контроля в процессе шлифования детали

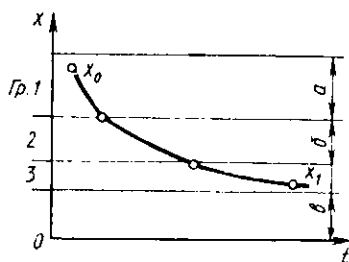


Рис. 11.7. Изменение размера в процессе шлифования:

а — припуск на черновую обработку; б — припуск на финишную обработку; в — допуск на размер



Рис. 11.8. Изменение контролируемого параметра в процессе автоматической подналадки

но равна времени, необходимому для того, чтобы обрабатывающий инструмент изменил величину контролируемого параметра от некоторого начального значения x_0 до заданного значения x_1 . Примерный процесс изменения контролируемого параметра графически показан на рис. 11.7. В процессе обработки величина контролируемого параметра проходит ряд зон (1-я, 2-я, 3-я).

Скорость перемещения обрабатывающего инструмента при шлифовании находится в зависимости от номера зоны, в пределах которой в данный момент лежит величина контролируемого параметра: в момент перехода из зоны 1 в зону 2 скорость обработки снижается, при переходе в зону 3 скорость обработки падает до нуля, т. е. контролируемый параметр получает значение x_1 и процесс обработки прекращается.

К устройствам активного контроля относится и так называемая *автоматическая подналадка*. Ее сущность сводится к периодической (иногда непрерывной) автоматической корректировке положения обрабатывающего инструмента по командным сигналам, возникающим на выходе измерительного преобразователя в процессе измерения параметров обработанных изделий. Обрабатываемые изделия потоком продвигаются от позиции обработки к позиции контроля. Положение обрабатывающего инструмента должно быть таково, чтобы обеспечить выдерживание соответствующего параметра изделия в пределах допуска. Примерный процесс изменения контролируемого параметра при применении данной системы показан на рис. 11.8.

Момент времени t_1 определяет собой начало измерения изделий,двигающихся сплошным потоком от места их обработки к месту контроля (измерительной позиции).

В случае системы с прерывистым контролем по одному пределу изменения контролируемого параметра происходит в пределах двух зон 2 и 1, в сумме образующих допуск на окончательный размер. Момент достижения параметром P границы между упомянутыми зонами, называемой *верхним контрольным пределом*, используется для образования предупредительного сигнала о приближении к верхнему пре-

делу допуска (точка A). Этот сигнал создает команду корректировки положения обрабатывающего инструмента, что в частном случае сводится к его быстрому перемещению на определенную величину, вследствие чего, как видно из рис. 11.8, б, контролируемый параметр получает новое значение, близкое к *нижнему контрольному пределу*. При этом величина перемещения обрабатывающего инструмента подбирается такой, чтобы не допустить снижения параметра ниже упомянутого предела.

Таким образом, точка A соответствует моменту образования команды окончания измерительного процесса $t_{изм}$ и начала исполнительного процесса $t_{исп}$. Это происходит в некоторый момент времени t_2 , смещенный относительно точки A на величину, определяемую собственным временем срабатывания системы.

Длительность исполнительного процесса $t_{исп}$ определяется суммой, состоящей из времени t_k , необходимого для завершения корректировки обрабатывающего инструмента, времени t_0 , необходимого для передвижения изделия от места обработки до места контроля, и времени t_r , в течение которого одно изделие проходит через измерительную позицию.

Очевидно, что $t_{исп}$ должно получать значение не короче следующего:

$$t_{исп} = t_k + t_0 + t_r.$$

Возобновление измерительного процесса происходит в некоторый момент t_3 , совпадающий с окончанием исполнительного процесса.

Итак, мы видим, что в рассматриваемой системе контрольный процесс имеет прерывный характер и состоит из отдельных измерительных периодов.

При построении электроавтоматической системы управления необходимо учитывать то обстоятельство, что практически контролируемый параметр P никогда не изменяется в строгом соответствии с теоретической кривой $P = f(t)$, представленной на рис. 11.8. В силу наличия случайных факторов, связанных с условиями обработки, параметр каждого изделия, входящего в общий поток, получает значение, отклоняющееся на некоторую величину от кривой $P = f(t)$; в результате образуется картина рассеивания размеров, схематически показанная на рис. 11.9, где отмечены точки, соответствующие значениям контролируемого параметра каждого изделия.

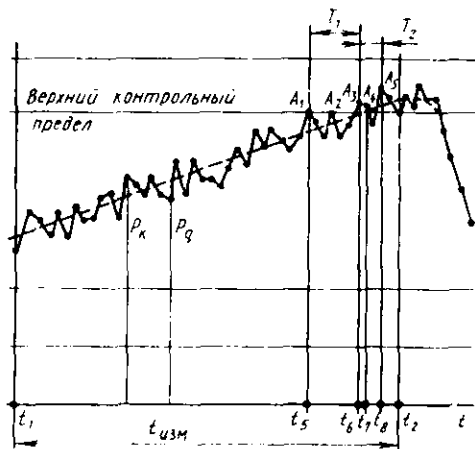


Рис. 11.9. Рассеивание размера обрабатываемых деталей в процессе обработки

Вследствие рассеивания размеров нельзя допустить, чтобы первый же случайный размер, превышающий верхний контрольный предел, вызывал команду на включение исполнительного процесса, поэтому рекомендуется систему строить таким образом, чтобы указанная команда возникла после того, как на протяжении некоторого промежутка времени T_k произошло n случаев захода контролируемого параметра за верхний контрольный предел. Значения T_k и n подбираются в зависимости от вида процесса обработки и вероятностного закона рассеивания.

На рис. 11.10 дана примерная схема, поясняющая подналадочный процесс при бесцентровом шлифовании деталей. Детали, прошедшие через позицию обработки (в данном случае шлифовальные круги 3), достигают контрольной позиции, пройдя путь s_0 . Они могут двигаться либо сплошным потоком, либо иметь между собой разрывы s (в качестве примера образования разрывов можно привести случай плоско-го шлифования поршневых колец).

Каждая деталь 1, проходящая через контрольную позицию, создает в измерительном преобразователе 2 командные импульсы, подаваемые на электронный усилитель-преобразователь 4, образующий команды управления y . Обычно обеспечивается невозможность реагирования системы на случайные разрывы s . Система может быть развита далее путем введения в нее дополнительных элементов, предназначенных для осуществления сортировки обработанных деталей по диапазонам допуска на параметр P .

Устройства с автоматическим адресованием контролируемых деталей по заданному параметру (селекционная сортировка). К сортирующим относятся такие устройства, в которых результаты контроля воздействуют на исполнительный орган, принудительно направляющий изделие в соответственный приемник.

При наличии автоматической загрузки эти устройства по своей пропускной способности в состоянии заменить от 3 до 30 контролеров, а благодаря повышенной точности они позволяют решать задачи селекционной сборки прецизионных узлов, таких, например, как топ-

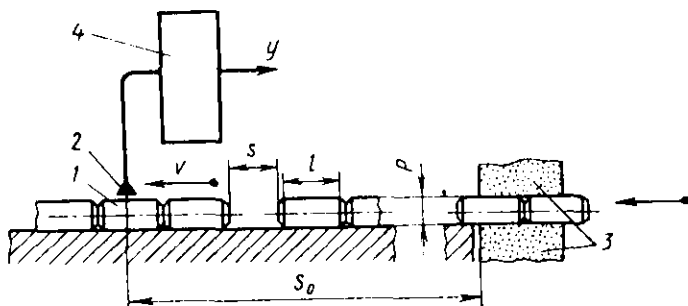


Рис. 11.10. Схема активного контроля, управляющего автоматической подналадкой инструмента

ливная аппаратура двигателей внутреннего сгорания (распылители, топливные насосы и т. д.). Ниже рассматривается типичная кинематическая схема построения контрольно-сортiroвочного автомата (рис. 11.11).

В данном частном случае автомат предназначен для контроля диаметров цилиндрических деталей типа роликов или шлицевых рикоординаторов и рассортировки их на четыре группы, из которых две группы годные и две группы брака («+» и «—»), как это объяснено на рис. 11.12.

Общий допуск на диаметр разбит на два диапазона. Все, что лежит выше группы 1, относится к браку по верхнему пределу (брак «+»); что лежит ниже группы 2, относится к браку по нижнему пределу (брак «—»).

На том же рис. 11.12 дан *граф доминирования*, который обычно устанавливают заранее в соответствии с требованиями технологического процесса. Из графа доминирования видно, что главным (доминирующим) показателем сортировки здесь является группа, содержащая брак «—», если последний отсутствует, то «доминирует» группа, содержащая брак «+», далее определяющим размером является группа 1 и, наконец, группа 2.

Основным ведущим звеном механизма является распределительный вал 1, приводимый во вращение мотором 6 через посредство червячного редуктора 5 и промежуточной передачи (см. рис. 11.11). Кривошип 2, посаженный на вал 1, заставляет кулису 4 совершать качательные движения около оси 3. Кулиса осуществляет возвратно-поступательные движения каретки 8 по направляющим 7. Каретка 8 несет на себе толкатели 9, предназначенные для прокатывания деталей по измерительной базе. В каждый момент, когда толкатели 9 занимают крайнее левое положение, из канала 12 выпадает очередная игла, занимая положение 11; игла захватывается и прокатывается толкателем при движении из левого крайнего положения в правое.

Роль «распределительного вала» в автомате исполняет ведущий вал 1, так как каждый его оборот соответствует одному повторяющемуся циклу движений. На этом распределительном валу посажены два кулачка, один из которых служит для включения и выключения «измерительного периода», а второй — для включения и выключения «исполнительного периода» (т. е. включения и выключения в работу в режиме измерения и исполнения). Измерительный период начинается после попадания детали (иглы) под измерительные наконечники и заканчивается перед выходом иглы из-под наконечников.

В зависимости от метрологических особенностей контроля, возможностей электроавтоматики и состояния контролируемого параметра во время измерительного периода включение обоих «периодов» может происходить при различных значениях угла поворота распределительного вала.

Оба периода начинаются одновременно, причем исполнительный период продолжается значительную часть оборота распределительного вала, что с избытком обеспечивает необходимую выдержку времени

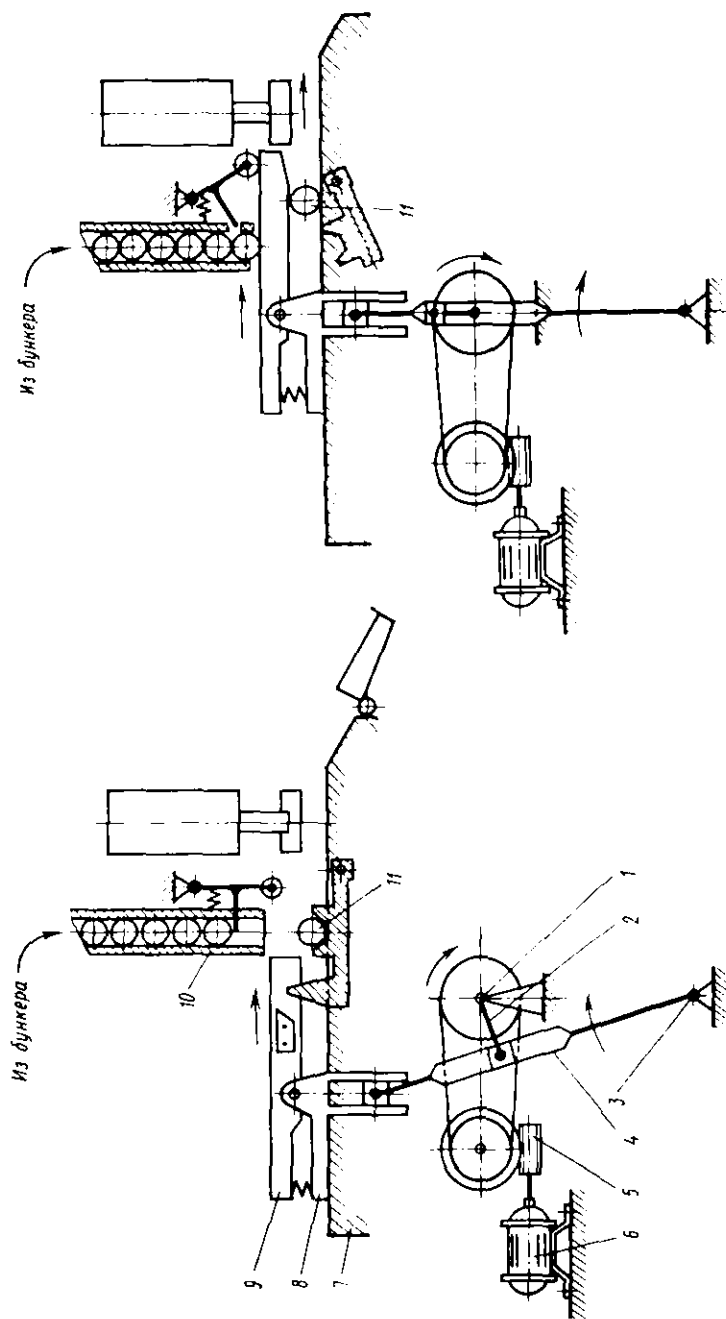


Рис. 11.11. Пример построения кинематической схемы контрольно-сортировочного автомата

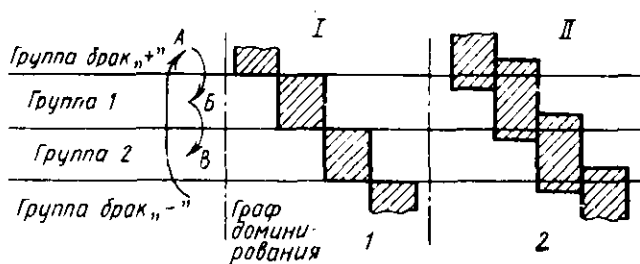


Рис. 11.12. Схема сортировки на группы с учетом погрешности контроля

для прохода проконтролированной иглы от измерительного блока до направляющего и поворотного желоба.

В нашем случае измерительный период совпадает с движением толкателей вперед. Это означает, что автомат работает «на проход», не задерживая иглы на измерительной позиции. Практически здесь измерительный период длится 0,04 ... 0,05 с, в то время как исполнительный период длится 0,7 ... 0,8 с.

В механическую часть автомата входят загрузочный бункер, транспортирующая система, измерительный блок и сортировочный (исполнительный) механизм.

Диаметр каждой иглы в данном случае контролируется одновременно в трех сечениях с проворачиванием иглы вокруг своей оси, что дает возможность проверить размеры по всем диаметрам данного сечения. Здесь, следовательно, многодиапазонная сортировка сочетается с многомерным контролем. Точность контроля (предельная погрешность) $3\sigma : \pm 1$ мкм.

В процессе контроля, как видно из рис 11.13, игла 1 прокатывается по калиброванной опорной плоскости 2 под измерительными наконечниками 3 трех датчиков, входящих в состав первичного преобразовательного звена автомата. Измерительные наконечники оформлены в виде удлиненных пластин, нижние грани которых выдержаны параллельными плоскости калиброванной пластины 2. Во время пребывания под измерительными наконечниками игла успевает сделать $1/2$ оборота.

Калиброванная пластинка (измерительная база), по которой прокатывается контролируемая игла, изготовлена из материала повышенной износостойкости. Само прокатывание иглы осуществляется по схеме, изображенной на рис. 11.13 и 11.14.

Параллельно плоскости качения совершают возвратно-поступательные движения толкатели 4, которые при каждом своем рабочем ходе захватывают очередную иглу и, производя на нее непрерывное давление, заставляют ее прокатываться по калиброванной пластине 2 под измерительными наконечниками 3. Таких толкателей может быть два, каждый из них проходит в промежуток между соседними измерительными шпинделями.

После прохождения через измерительную позицию (под наконечниками датчиков) деталь подкатывается к краю плоскости качения, где она освобождается от толкателей и далее собственным весом продвигается по наклонной плоскости к исполнительному механизму сортировки.

Схема исполнительного механизма сортировки автомата дана на рис. 11.14. Скатываясь по наклонной плоскости 6, деталь 5 попадает на поворотный желоб 7. Последний посредством системы кривошипов и шатунов 2 связан с тремя электромагнитами 1 и может поворачиваться вокруг своей оси 3, занимая четыре фиксированных положения против одного из четырех неподвижных направляющих желобов 8, 9, 10 и 11, что зависит от сигналов, поступающих от датчиков, т. е. от диаметра детали. Одно из этих четырех положений соответствует обесточенным электромагнитам. По окончании исполнительного периода поворотный желоб занимает исходное положение, соответствующее обесточенному состоянию всех трех электромагнитов.

Включение «измерительного» и «исполнительного» периодов в простейшем случае осуществляется с помощью вращающихся кулачков, закрепленных на распределительном валу автомата и в соответственные промежутки времени.

Упомянутые кулачки закрепляются на валу кривошипа 2 (см. рис. 11.11) и, таким образом, обеспечивается синхронизация замыканий и размыканий контактов 1—2 и 2—3, включающих «измерительные» и «исполнительные» периоды контрольного процесса. Циклограмма включения измерительного и исполнительного периодов в функции угла поворота вала кривошипа показана на рис. 11.15.

Необходимо отметить, что применение электрических контактов, управляемых с помощью механического кулачкового привода, нельзя признать достаточно надежным условием работы контрольного автомата, особенно в условиях автоматизированного производства. Их недостаточная надежность характеризуется рядом обстоятельств, главными из которых являются возможность порчи поверхности контактов (электрическая эрозия), а также их поломка вследствие часто повторяющейся упругой деформации во время работы контрольного автомата.

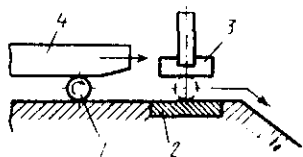


Рис. 11.13. Схема ввода и прокатывания цилиндрической детали на контрольной позиции

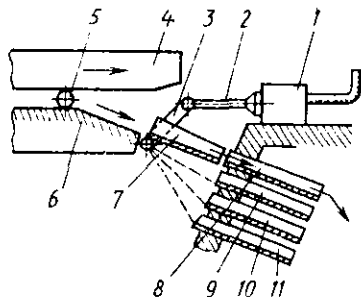


Рис. 11.14. Схема построения исполнительного механизма автоматической сортировки

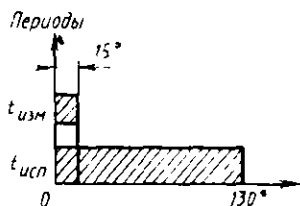


Рис. 11.15. Циклограмма включения измерительного и исполнительного периодов контрольного автомата

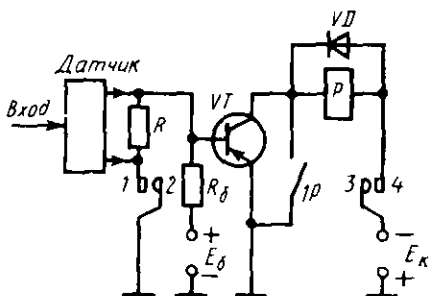


Рис. 11.16. Схема электронного преобразования сигналов датчика и передачи их на исполнительный орган

Рассмотрим некоторые пути повышения надежности контактной пары с помощью средств электроавтоматики и, в частности, электронной техники.

1. Ток, проходящий через контактные пары, должен быть минимальным и не превышать 200–300 мкА при включении в замыкаемых или размыкаемых ими электрических цепях индуктивных сопротивлений, так как наличие индуктивности может способствовать возникновению межконтактного искрения (из-за появления противоЭДС в цепи индуктивности). Практически используется электронная схема, изображенная на рис. 11.16, где показан некоторый датчик, на вход которого подается контролируемая величина, которая через посредство транзистора VT воздействует на обмотку P промежуточного электромагнитного реле с исполнительными контактами.

Ток с выхода датчика подается на сопротивление R , включенное в цепь базы транзистора VT , а контактная пара 1–2, включающая измерительный период, пропускает через себя ток базы транзистора. Контактная пара 3–4 (рис. 11.16), управляющая исполнительным периодом $T_{исп}$, включена в коллекторную цепь транзистора VT и пропускает через себя ток 1–2 мА и, следовательно, работает в ухудшенных условиях по сравнению с контактной парой 1–2 и поэтому требует более тщательного технического надзора. Снижению искрения между контактами способствует диод, шунтирующий обмотку реле P в момент возникновения противоЭДС.

2. В ряде случаев может быть рекомендовано применение герконов (герметизированных контактов), размещенных в специальных герметических баллонах, заполненных каким-либо газом, не вступающим в химическую связь с поверхностью контактов (рис. 11.17). Введенные в баллон ферромагнитные пружины 1 и 2 одновременно являются контактами, управляемыми внешним магнитным полем, создаваемым катушкой 3 при подаче на ее вход некоторого напряжения U . Контактные поверхности пружин покрывают золотом, родием или палладием. Время срабатывания геркона $t_{ср}$ составляет от 1 до 3 мс, а вре-

мя отпущения $t_{отп}$ около 0,8 мс. Коммутируемый ток составляет 0,2—0,5 А.

Кулачковый способ замыкания и размыкания контактов управления измерительным или исполнительным периодами контрольного автомата может быть заменен более надежным бесконтактным способом.

Как видно из рис. 11.18, контактная пара может быть заменена плоским ферромагнитным сердечником 3, оснащенным катушками L_1 ,

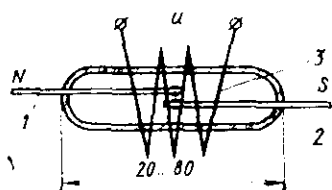


Рис. 11.17. Схема геркона

L_2 и L_3 . Первые две из них входят в колебательный контур генератора гармонических колебаний, построенного на транзисторе T_1 (рис. 11.19). Генератор настраивается таким образом, что колебания в контуре могут возникнуть только при условии, если в зазоре сердечника 3 (рис. 11.18) отсутствует какой-либо постоянный диамагнитный предмет. Переменное магнитное поле сердечника возбуждает в третьей обмотке L_3 переменный ток, который выпрямляется с помощью диода VD_1 (рис. 11.19) и создает на базе транзистора VT_2 отрицательный потенциал относительно эмиттера. Таким образом, транзистор T_2 удерживается в открытом состоянии, а транзистор VT_3 при этом заперт.

Изображенный на рис. 11.18 барабан 2 несет на себе вместо механического кулачка пластину 1, которая при попадании в воздушный зазор сердечника 3 вызывает срыв генерации. В результате исчезает напряжение между концами катушки L_3 ; при этом транзистор VT_2 запирается, а на эмиттере транзистора VT_3 возникает положительный потенциал относительно базы; транзистор T_3 отпирается, а его коллекторный ток проходит через управляющую катушку геркона. Вследствие этого ферромагнитные контакты геркона замыкаются и включают соответственно измерительный период или исполнительный период контрольно-сортировочного автомата или какую-либо другую цепь автоматического устройства.

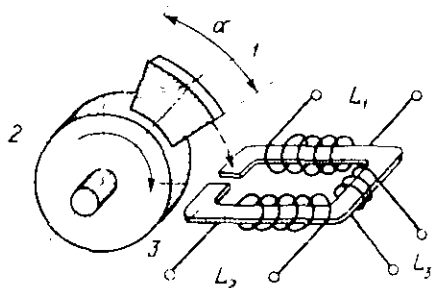


Рис. 11.18. Принцип бесконтактного управления измерительным или исполнительным периодами

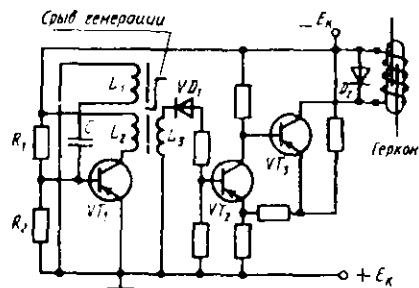


Рис. 11.19. Схема электронного управления работой геркона

Как видно из рис. 11.18 срыв генерации продолжается на этапе поворота барабана в пределах заданного угла α , и следовательно, в пределах этого угла контакты геркона находятся в замкнутом состоянии.

Рассмотренная бесконтактная схема управления обеспечивает надежную синхронизацию включения электрических цепей с положением изделия в контрольно-сортировочном автомате.

3. Электронные средства позволяют удерживать в замкнутом состоянии исполнительные контакты и без применения схемы бесконтактного управления, использующей принцип срыва генерации. Существует большое разнообразие подобных схем. Так, например, схема модулятора длительности электрического импульса (рис. 11.20) требует только подачи команды на замыкание исполнительных контактов, размыкание же исполнительной цепи проходит автоматически после надлежащего отсчета времени. Показанная на рис. 11.20 схема обычно называется *ждущим мультивибратором*, одно из плеч его (транзистор VT_1) и сопротивление R_1 питаются от источника постоянного напряжения U_1 .

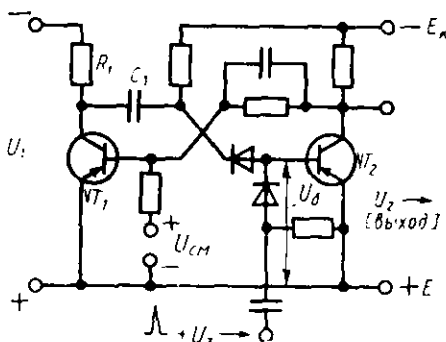


Рис. 11.20. Схема построения ждущего мультивибратора

В исходном состоянии схема находится в устойчивом состоянии, когда транзистор VT_1 заперт, а транзистор VT_2 полностью открыт током базы (находится в состоянии насыщения). В этих условиях конденсатор C_1 заряжен до некоторого напряжения U_{C0} , $U_1 - U_0$, где U_0 — напряжение на базе транзистора.

Если подать на схему короткий положительный импульс U_3 , то транзистор VT_2 запирается и переводит схему в состояние, при котором на выходе возникает отрицательное напряжение U_2 , длительность которого определяется временем перезарядки конденсатора C_1 от напряжения U_{C0} до некоторого напряжения $-U$. При напряжении $-U$ триод VT_2 вновь отпирается, выходное напряжение U_2 падает до нуля, т. е. схема приходит в исходное состояние.

Изменяя с помощью напряжения U_1 напряжение U_{C0} , можно устанавливать необходимую длительность выходного напряжения U_2 , которое и используется для управления цепями последующего преобразования (например, длительностью $t_{изм}$ или $t_{исп}$).

Для сложных систем автоматического управления, где требуется наличие сотен и тысяч активных и пассивных логических элементов, транзисторная техника оказалась недостаточно надежной. Новое поколение надежной электронной техники начало развиваться после создания по особой технологии больших интегральных схем (БИС),

оформленных в виде «кристалла», содержащего несколько десятков и даже сотен тысяч элементов, приходящихся на один квадратный сантиметр, при толщине «кристалла», лежащей в пределах 0,2 - 0,3 мм.

Большие интегральные схемы положили начало созданию микропроцессоров, т. е. особым надежных и весьма малогабаритных устройств, способных на основании поступающих в них определенных сигналов информации, содержащих данные о результатах измерений, проводить их преобразования с выводом соответствующих команд управления технологическими процессами.

§ 11.4. ДАТЧИКИ КАК ПЕРВИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОАВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Основная задача первичного измерительного преобразователя заключается в непосредственном измерении контролируемого параметра с образованием на выходе некоторой физической величины, чаще всего электрического напряжения. Эта выходная величина линейно зависит от контролируемого параметра и может изменяться плавно либо принимать скачкообразные (дискретные) значения. Последнее зависит либо от размера контролируемого параметра, либо от того диапазона допуска, в пределах которого находится доминирующее значение этого параметра. Первичный преобразователь образуется из того или иного датчика, непосредственно воспринимающего величину контролируемого параметра. При этом под понятием *измерение* мы будем понимать в общем случае выявление номера сортировочной группы (диапазона допуска), в пределах которого находится данный параметр, а под понятием *контроль* мы будем понимать установление факта, что данный параметр находится в пределах заданного диапазона допуска. Измерение и контроль часто объединяются в одном процессе, который обычно называют *контрольно-измерительным процессом*. Такие задачи обычно выполняют контрольно-сортировочные автоматы или приборы.

Во многих случаях может возникнуть необходимость установления на автомате визуальных или записывающих приборов в качестве дополнительных устройств, дающих возможность судить об истинных величинах контролируемых параметров. В случае высокоавтоматизированного производства такая информация может передаваться в центральный орган управления с выводом ее при необходимости на дисплей.

Сущность работы первичного измерительного преобразователя контрольно-сортировочного автомата заключается в сравнениях контролируемых параметров детали с параметрами некоторого калиброванного образца данной детали и в зависимости от результатов этого сравнения в создании надлежащего командного сигнала, направляющегося к промежуточному преобразователю, связанному с исполнительными органами.

Начнем рассмотрение процесса образования командных сигналов в первичном преобразователе с датчиков со скачкообразной (дискретной) характеристикой. К подобного рода датчикам относятся широко известные в машиностроении *электроконтактные датчики*. Наиболее распространенный электроконтактный датчик, называемый обычно двухпредельным, схематически изображен на рис. 11.21. Он состоит из жесткого корпуса, подвижным элементом которого является измерительный шток 1, в зависимости от положения которого замыкается один из контактов В (верхний) или Н (нижний). С помощью жесткой стойки 5 датчик закрепляется относительно измерительной плоскости 6. Подвижный шток с насаженным на него измерительным наконечником 3 упирается под действием пружины 2 на контролируемую деталь 4, расположенную на измерительной плоскости 6. Электрический контакт Н выполняет роль ограничителя перемещения штока 1 и одновременно служит для подачи сигнала о заходе размера детали 4 за нижний предел (брак «-»).

Измерение размера контролируемой детали 4 приводит к соответственному перемещению штока 1 и, следовательно, повороту рычага с запрессованными в него вольфрамовыми контактами 7. Измерительное усилие создается пружиной 2. При заходе контролируемого размера за верхний предел замыкается контакт В, выдавая тем самым команду брака по верхнему пределу (брак «+»). Настройка датчика на пределы Н и В достигается поворотами оцифрованных барабанов соответственно 8 и 9 по настроечным калибрам. В принципе число пределов двухпредельного датчика может быть и увеличено.

Погрешность контроля с помощью электроконтактных датчиков составляет величину в пределах ± 1 мкм, иногда $\pm 0,5$ мкм.

Точность и стабильность электроконтактных датчиков достигаются не только благодаря качественному изготовлению, но и благодаря выдерживанию необходимого режима, при котором ток через контакты не должен превышать 200–300 мкА (в некоторых случаях 10–15 мкА) при практически полном отсутствии межконтактных искрений. В этих целях используется промежуточный преобразователь импульсов, одно из главных назначений которого — усиление слабых токов, возникающих в цепях датчиков и соответствующее управляющее воздействие на исполнительный орган (например, автоматическая разбраковка или сортировка, корректирование процесса обработки и т. д.).

На рис. 11.22 представлена одна из типовых схем построения промежуточного преобразователя сигналов двухпредельного электроконтактного датчика (ЭКД) с воздействием на исполнительные силовые электромагниты Э₁ и Э₂, осуществляющие рассортировку на три группы: годные, брак «+» (исправимый) и брак «-» (исправимый). Каждый из контактов В и Н соединен соответственно с транзисторами VT₁ и VT₂, в коллекторные цепи которых включены обмотки промежуточных электромагнитных реле Р₁ и Р₂. На схеме соответственно показаны контакты К_{зам} для включения измерительного периода $t_{изм}$ и К_{исп} — для включения исполнительного периода $t_{исп}$. В положе-

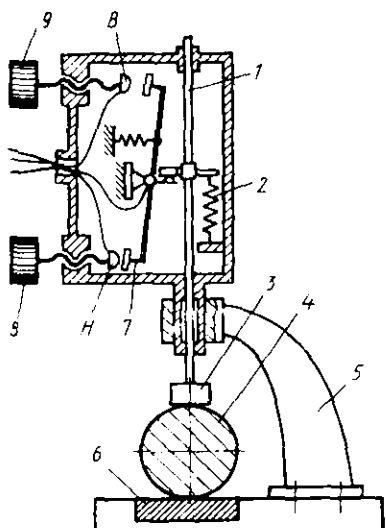


Рис. 11.21. Схема двухпредельного электроконтактного датчика

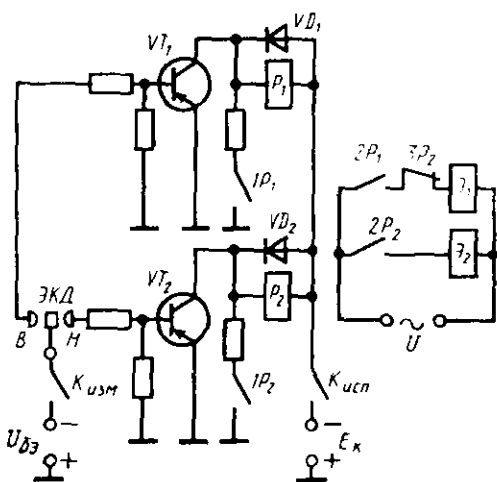


Рис. 11.22. Электронная схема преобразования сигналов электроконтактного датчика

нии, изображенном на схеме рис. 11.22, размер детали находится в пределах допуска: транзисторы VT_1 и VT_2 заперты, оба реле P_1 и P_2 обесточены, их выходные (исполнительные) контактные пары $2P_1$ и $2P_2$ разомкнуты, и поэтому электромагниты $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ тоже обесточены. Деталь проталкивается в группу годных.

В случае брака по нижнему пределу (замкнут контакт H датчика) отпирается транзистор VT_2 , срабатывает промежуточное реле P_2 и замкнувшаяся при этом контактная пара $2P_2$ включает бракующий электромагнит $\mathcal{E}_2$. Аналогично, при наличии брака по верхнему пределу (замкнут контакт B датчика) включается сортирующий электромагнит $\mathcal{E}_1$.

Схема (рис. 11.22) предусматривает и исполнение принципа доминирования группы брак «—» над группой брак «+» путем введения в цепь питания электромагнита $\mathcal{E}_1$ нормально замкнутой исполнительной контактной пары $3P_2$, принадлежащей реле P_2 . Таким образом, если в процессе контроля деталь вращается и обладает некоторой овальностью, снижающей ее размер ниже нижней границы допуска, то она обязательно попадает в брак.

Кроме датчиков, получивших название *предельных*, решающих задачи контроля первого типа (и, как будет показано в дальнейшем, третьего типа), широкое применение находят электроконтактные датчики, которые получили название *амплитудных*. Они предназначены для осуществления контроля второго типа (например, овальность цилиндрической детали, разнотолщинность плоской детали) и для контроля четвертого типа.

Существует несколько конструктивных оформлений амплитудных датчиков. Мы рассмотрим один из возможных вариантов. На рис. 11.23 показан датчик с контактным рычагом, состоящим из двух звеньев (1 и 3), связанных друг с другом шарниром 2. Звено 1, несущее на себе контакт K_1 , может поворачиваться в пределах некоторого угла относительно основного звена 3 и при условии отсутствия посторонних сил удерживаться под установившимся углом сколь угодно долгий промежуток времени вследствие постоянного трения в шарнире 2. В свободном состоянии датчика контактное звено, упираясь в контакт H , образует некоторый предельный угол β с основным звеном 3.

При осуществлении контроля корпус такого датчика может быть обычным образом жестко закреплен относительно измерительной базы, причем таким образом, чтобы самое минимально возможное значение изменяющегося параметра P обеспечило поворот контактного рычага на угол, достаточный для соприкосновения его с контактом H_1 . Последний используется в датчике в качестве упора, ограничивающего движение контактного рычага. Вследствие этого любое возрастание параметра P сопровождается возрастанием угла α между звеньями рычага.

В процессе движения изделия могут иметь место и возрастание, и убывание величины P . Возрастания приводят к возрастанию угла α , а убывания приводят к отходу контакта рычага от упора B_1 без изменения угла α . Если в процессе снижения значения P произойдет замыкание контакта H_1 , образуется сигнал, означающий заход величины колебания линейного размера за пределы допустимого. Естественно, что исходным положением штока должно быть такое, которому соответствует максимальное значение параметра P , поэтому во время измерительного периода изделие должно быть продвинуто дважды под шток датчика: первое движение является «установочным» и имеет своей задачей улавливание максимального значения параметра P , которому соответствует максимальное значение угла α . Второе движение является уже собственно контрольным. В момент перехода от первого движения ко второму изделие не должно отрываться от шпинделя.

Настраивается рассмотренный датчик на контроль допустимого колебания линейного размера либо по настроечному калибру, либо по контактному лимбу. Калибр представляет собой образец контролируемого изделия, у которого заведомо контролируемый параметр P сделан изменяющимся в допустимых пределах его колебания.

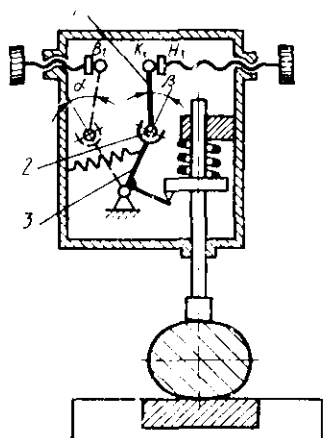


Рис. 11.23. Схема амплитудного электроконтактного датчика

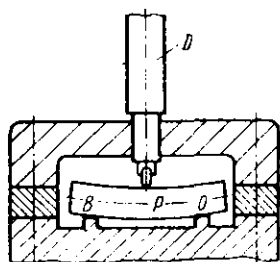


Рис. 11.24. Контроль цилиндрической детали по диаметру

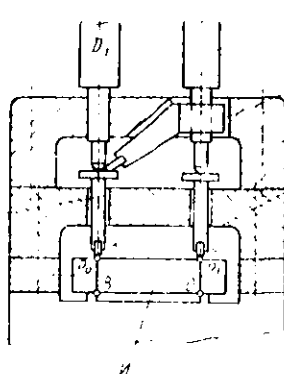
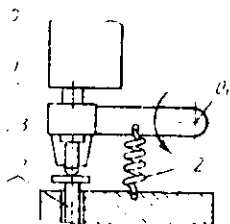


Рис. 11.25. Контроль диаметра и конусности



Во многих случаях приходится обратным образом использовать контакты B и H . Это имеет место в таких автоматических устройствах, в которых введение контролируемого изделия на измерительную позицию требует предварительного принудительного подъема измерительного цилиндра. В таких устройствах роль упора исполняет контакт H , а возбудителем командного сигнала является контакт B .

Ниже приводятся некоторые практические примеры образования командных импульсов при использовании электроконтактных датчиков.

На рис. 11.24 изображен случай контроля изделия по среднему сечению с помощью одного датчика. Такой способ контроля допустим при условии, когда заведомо известно, что конусность и непрямолинейность образующих цилиндрического изделия находятся в пределах допуска, причем последний весьма мал по сравнению с диапазоном сортировочной группы. Вращением изделия вокруг своей оси может быть разрешена задача контроля диаметра и овальности.

Образование командных импульсов происходит: а) при контроле только диаметра — *контроль первого типа*; б) при совмещении контроля диаметра с контролем овальности (контроль первого типа и контроль второго типа); в) при контроле только овальности — *контроль второго типа*.

На рис. 11.25 показана схема расположения датчиков, сочетающая в себе контроль диаметра с контролем конусности. Схема предполагает, что бочкообразность, седлообразность, прямолинейность образующей и овальность изделия практически отсутствуют.

Контроль диаметра производится датчиком D_1 в сечении BK .

Контроль конусности осуществляет датчик D по способу третьего типа. Требуемое условие жесткой связи датчика D с точкой K параметра P_a осуществляется с помощью упора 1 через посредство промежуточного подвижного штока $П_1$, относящегося также к датчику D_1 . Возможность «плавания» датчика D достигается подвешиванием упо-

ра I на оси O_1 , закрепленной в корпусе $З$ (см. правую проекцию рис. 11.25). Таким образом, весь корпус датчика может качаться вокруг оси O_1 , прижимаясь с помощью пружины 2 своим корпусом к промежуточному штоку $П_1$, измерительный же шток датчика $Д$ упирается в изделие через посредство промежуточного штока $П$. В пределах малого угла поворота упора вокруг оси O_1 перемещение корпуса датчика $Д$ можно считать параллельным перемещению промежуточного штока $П_1$.

Для контроля конусности, при отсутствии вращения изделия, здесь может быть применен контроль третьего типа.

Расположение датчиков при контроле взаимного биения поверхностей двух составляющих цилиндрических ступеней валика показано на рис. 11.26.

Мы имеем здесь характерный случай контроля величины колебания разности двух линейных размеров P и P_0 (контроль четвертого типа). Корпус датчика $Д$ жестко связан с точкой K на поверхности ступени I , в то время как шток его опирается на поверхность ступени II в точке C . Во время измерения происходит проворачивание изделия на базе $ОВ$. При этом возможность «плавания» датчика достигается подвешиванием его упора I по методу, рассмотренному на рис. 11.25.

Контроль величины взаимного биения поверхностей ступенчатого валика одновременно является и контролем *соосности* между составляющими его цилиндрическими ступенями. Признаком соосности двух сечений служит равенство отрезков M_iM_i и N_iN_i , заключенных между контурами сечений на любой паре радиусов, расположенных на одном и том же диаметре, проходящем через центр одного из сравниваемых сечений. При этом в задачу контроля соосности входит выявление факта пребывания в допустимых пределах разности отрезков M_iM_i и N_iN_i для любого диаметра.

Как минимум, следует контролировать два таких диаметра, взятых под прямым углом друг к другу (отрезки M_1M_1 , N_1N_1 , M_2M_2 , N_2N_2 на рис. 11.27). Нетрудно понять, что на этом рисунке мы имеем дело с таким контролем.

Рассмотренные схемы расположения датчиков в целях образования командных импульсов при контроле цилиндрических гладких и ступенчатых изделий могут быть развиты для контроля параметров изделий самых разнообразных форм и конфигураций.

Кроме электроконтактных датчиков в электроавтоматическом контроле широкое распространение находят так называемые *индуктивные датчики*. В отличие от электроконтактных датчиков выходная

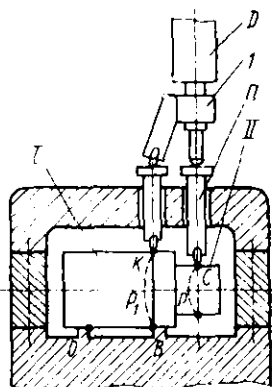


Рис. 11.26. Контроль соосности цилиндрических ступеней

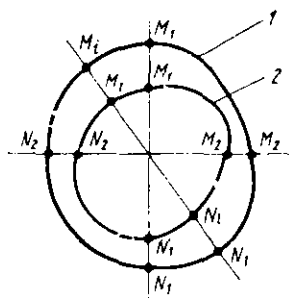


Рис. 11.27. Пояснение принципа контроля совпадения:
1 — сечение первого цилиндра; 2 — сечение второго цилиндра

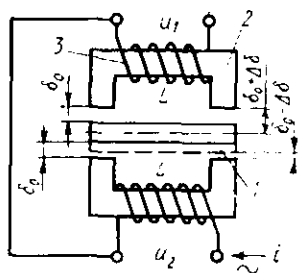


Рис. 11.28. Принцип построения индуктивного датчика

величина индуктивного датчика характеризуется непрерывной зависимостью от контролируемой геометрической величины, т. е. от перемещения измерительного наконечника датчика. Принцип построения индуктивного датчика поясняет рис. 11.28. Перемещение измерительного штока механически связано с пластиной 1, изготовленной из армо-железа. Пластина 1 размещается между двумя ферритовыми сердечниками 2 со встречно расположенными катушками 3. Через катушки пропускается переменный ток i .

Если пластина 1 размещена симметрично относительно сердечников с зазорами δ_0 , то индуктивности L обеих катушек равны и, следовательно, суммарное сопротивление каждой из них (Z_1 и Z_2)

$$Z_1 = Z_2 = j\omega^2 L^2 + r^2, \quad (11.19)$$

где r — активное сопротивление каждой катушки; ω — угловая частота, характеризующая переменный ток.

Вместе с перемещениями $\Delta\delta$ измерительного штока изменяются зазоры между ферромагнитной пластиной и сердечниками (пунктирное изображение на рис. 11.28)

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \delta_0 + \Delta\delta, \\ \delta_2 &= \delta_0 - \Delta\delta. \end{aligned} \quad (11.20)$$

Вследствие этого суммарное сопротивление одной из индуктивных катушек уменьшается и на столько же увеличивается сопротивление другой катушки.

Пренебрегая воздействиями различных прочих факторов, можно написать:

$$\begin{aligned} Z_1 &= j\omega^2 (L - \Delta L)^2 + r^2, \\ Z_2 &= j\omega^2 (L + \Delta L)^2 + r^2. \end{aligned} \quad (11.21)$$

Это явление и используется в работе индуктивного датчика, как это показано на схеме рис. 11.29.

Измерительный шток датчика своим наконечником упирается в поверхность контролируемой детали 4 и с помощью пружинно-рычажного устройства устанавливает в соответствующее положение ферромагнитную пластину 1. Последняя, как уже указывалось, размещена между сердечниками 2 индуктивных катушек 3.

Катушки 3 совместно с индуктивностями L_1 и L_2 образуют индуктивный мост, питаемый источником переменного напряжения u_0 (до 15 В) с частотой в пределах 10 кГц.

Выходное переменное напряжение моста (между точками a и b) передается через трансформаторную связь на фазочувствительный усилитель-выпрямитель, питаемый переменным напряжением (ФЧУВ).

Выходное выпрямленное напряжение Y подается на соответствующий исполнительный орган. В схеме на рис. 11.29 напряжение Y подается на показывающий прибор 5.

Как правило, индуктивный датчик используется для измерения величины x отклонения размера от заданного номинального значения.

Таким образом, выходная величина Y зависит от величины x и имеет знак « $\cdot$ » или « $\times$ », определяемый знаком отклонения x от номинального значения.

Индуктивный метод измерения обладает высокой чувствительностью, точностью и надежностью, однако при условии жесткой стабилизации напряжений и частоты всех источников питания, а также стабилизации температурных факторов.

В отличие от электроконтактных датчиков в индуктивных датчиках отсутствуют электромеханические контакты, что существенно повышает надежность последних.

Индуктивный датчик обладает следующими примерными техническими показателями:

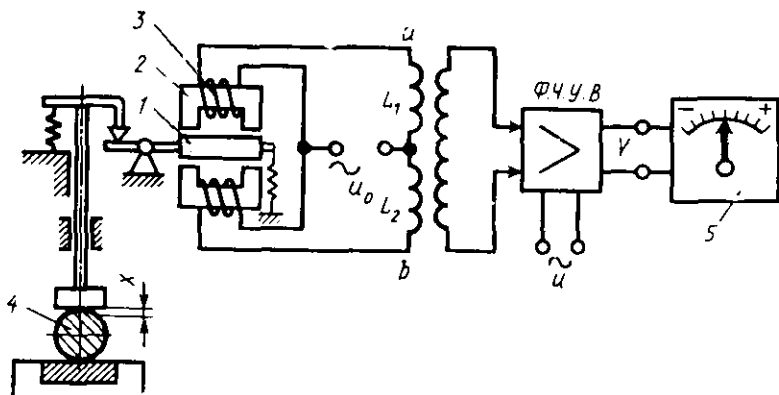


Рис. 11.29. Схема преобразования сигналов индуктивного датчика

рабочий участок характеристики, в пределах которого сохраняется необходимая линейность $\pm 0,3$ мкм;
 свободный ход штока $\pm 0,5 \dots \pm 0,08$ мм;
 чувствительность на рабочем участке 0,15 мВ/мкм;
 нелинейность на рабочем участке не более 2 %;
 измерительное усилие $2 \pm 0,25$ Н;
 погрешность измерения $\pm 0,5$ мкм.

Габаритные размеры датчика в зависимости от конструктивного оформления весьма разнообразны. На рис. 11.30 изображен безрычажный индуктивный датчик цилиндрической формы.

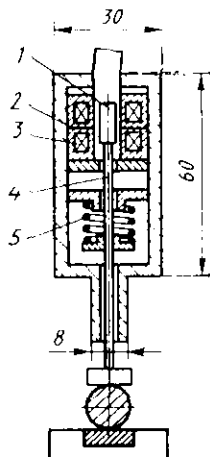


Рис. 11.30. Вариант конструктивного оформления индуктивного датчика

Для закрепления датчика предусмотрен цилиндрический хвостовик диаметром 8 мм или внешний цилиндрический корпус диаметром порядка 30 мм. На рис. 11.30 соответственно обозначены: 1 — ферромагнитный стержень, посаженный на измерительный шток 4, сердечники 2 и катушки индуктивности 3. Измерительное усилие создается пружиной 5. Индуктивный датчик может выполнять не только передачу информации на показывающий прибор (см. рис. 11.29), но и команды на автоматическую принудительную сортировку деталей на селекционные группы, а также воздействовать на процесс обработки по данным измерений. При необходимости путем применения аналого-цифрового преобразователя он может выдавать дискретно-числовую информацию для ввода в микроЭВМ в целях управления технологическим процес-

сом. Подобная принципиальная схема в упрощенном виде изображена на рис. 11.31, где 1 — контролируемая деталь, 2 — индуктивный датчик.

Вся цепь преобразования информации датчика условно изображена в форме преобразователя $ПР_1$. Таким образом, напряжение U_1 на выходе преобразователя $ПР_1$ представляет собой некоторую аналоговую величину, пропорциональную контролируемому отклонению размера детали 1. Процесс преобразования аналоговой величины U_1 в цифровую начинается с подачи сигнала *Запуск*, появляющегося в момент завершения ввода детали на измерительную позицию.

Сигнал запуск выполняет следующие команды: а) подача на выход преобразователя $ПР_1$ напряжения U_1 ; б) сброс на нуль двоичного электронного счетчика-регистра; в) установка на нуль генератора линейно изменяющегося напряжения (сброс и установка выполняются с помощью импульсного преобразователя 4).

С этого же момента начинаются следующие процессы: а) напряжение U_1 отпирает электронный ключ 9 и с генератора импульсов 8 на электронный счетчик-регистр поступают импульсы (порядка до

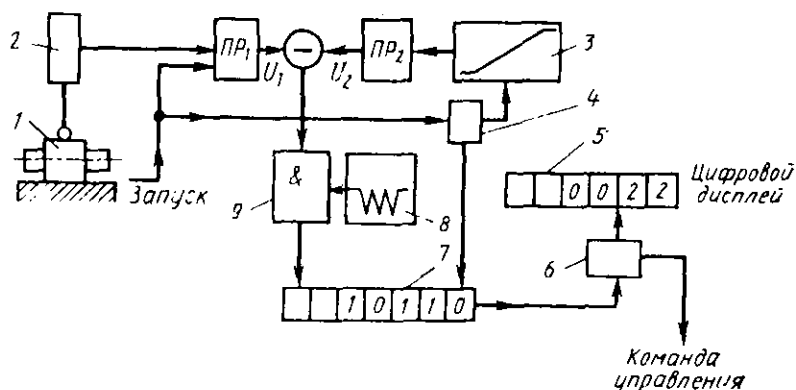


Рис. 11.31. Блок-схема преобразования информации индуктивного датчика
 1 - контролируемая деталь; 2 - индуктивный датчик; 3 - генератор линейно изменяющегося напряжения; 4 - импульсный преобразователь; 5 - цифровой дисплей; 6 - дешифратор; 7 - электронный счетчик-регистр; 8 - генератор импульсов; 9 - электронный ключ

10 кГц), которые им запоминаются; б) включается в действие генератор линейно изменяющегося напряжения, создающий на выходе преобразователя $ПР_2$ линейно возрастающее напряжение U_2 ; в) в момент, когда наступит соотношение $U_2 = U_1$, электронный ключ 9 теряет отпирающее напряжение и запирается, прекращая вход импульсов генератора 8 в электронный счетчик-регистр. Набранное им число, в данном частном примере 10110, соответствует отклонению контролируемого размера детали. Одновременно через посредство дешифратора 6 на цифровом дисплее фиксируется то же число в десятичном выражении, в данном случае 0,022 (мм). Это число может удерживаться в памяти сколь угодно долго, например до ввода на контроль следующей очередной детали или до завершения исполнения команды селекционной сортировки или воздействия на технологический процесс. Практически время контроля одной детали может составлять десятые и даже сотые доли секунды.

Кроме электроконтактных и индуктивных датчиков известны *пневматические датчики*, сущность работы которых сводится к преобразованию отклонений размера детали или какого-либо перемещения в давлении воздуха в некоторой камере.

Схема такого контроля изображена на рис. 11.32. Против контролируемой детали 1, опирающейся на соответственную измерительную плоскость, устанавливается камера 2, жестко закрепленная относительно упомянутой плоскости. Камера 2 оснащена двумя отверстиями — входным площадью F_1 и выходным площадью F_2 .

Камера устанавливается таким образом, чтобы между выходным отверстием F_1 (жиклером) и поверхностью детали создавался некоторый зазор δ величиной приблизительно 0,5 мм. Через входное отверстие F_1 в камеру 2 подается воздух со строго стабилизированным давлением около 0,15 МПа. Давление p воздуха в камере зависит от раз-

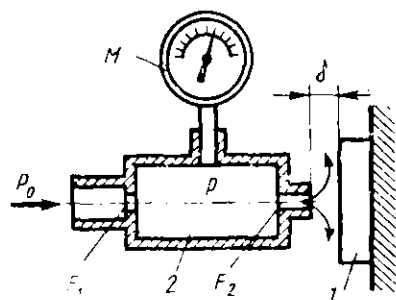


Рис. 11.32. Схема пневматического датчика

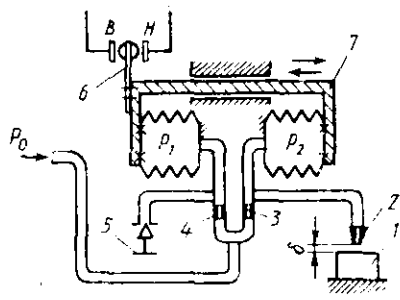


Рис. 11.33. Схема дифференциального пневматического датчика

ности между расходом воздуха, проходящего через входное отверстие F_1 , и расходом воздуха через выходное отверстие F_2 . Последнее, в свою очередь, зависит от зазора δ .

На определенном участке изменения δ эта зависимость может быть принята за линейную. В этом случае имеет место следующее выражение:

$$p = K\delta, \quad (11.22)$$

где K — коэффициент пропорциональности.

В простейшем случае размер можно контролировать манометром. Если манометр заменить электроконтактным или индуктивным датчиком, то процесс контроля можно автоматизировать.

Главное достоинство пневматического метода контроля заключается в отсутствии необходимости непосредственного соприкосновения измерительного органа с поверхностью детали. Погрешность контроля составляет около $\pm 0,3$ мкм.

Представляет существенный практический интерес дифференциальный сильфонный пневматический датчик, схематически изображенный на рис. 11.33. Главными составными элементами этого датчика являются упругие сильфоны, которые могут растягиваться или сжиматься под действием воздуха. Воздух под давлением p , проходя через узкие отверстия (жиклеры) 3 и 4, создает давления в сильфонах p_1 и p_2 . При этом давление p_1 оказывается постоянным, определяемым величиной регулируемого выходного отверстия 5.

Как видно из рис. 11.33, давление p_2 во втором сильфоне определяется зазором δ , образующимся между поверхностью контролируемой детали 1 и выходным отверстием (соплом) 2. Оба сильфона охвачены общей тяжкой 7. Таким образом, в зависимости от разности давлений p_1 и p_2 , т. е. от контролируемого размера детали, тяжка 7 может перемещаться влево и вправо. Тяжка связана с контактной системой 6, состояние которой определяется, следовательно, зазором δ . Контакты В и Н определяют в данном частном случае допустимые размеры конт-

ролируемой детали 1. Дальнейшее преобразование информации подобно преобразованию в электроконтактном датчике.

Существует большое разнообразие оформления сильфонных датчиков. Описанный принцип измерения во всех случаях одинаков. Главная особенность дифференциальных сильфонных датчиков заключается в существенно малом влиянии случайных колебаний входного питающего давления p_0 воздуха на результаты измерения (контроля) размера.

Средства образования первичной информации при автоматизации контроля размеров или механических перемещений не ограничиваются пневматическими, индуктивными и электроконтактными датчиками. В технике автоматического контроля перспективны оптические датчики, использующие разного рода световые лучи для преобразования первичной информации о контролируемых физических или геометрических параметрах деталей. Для подобных целей могут быть использованы световые лучи в видимом диапазоне, инфракрасные, рентгеновские лучи, γ -лучи и т.д., при этом в качестве источников излучения используются лампы накаливания, оптические квантовые генераторы (лазеры), люминофоры электронно-лучевых трубок, рентгеновские излучатели, светодиоды и т. д.

Примером выпускаемого промышленностью оптического датчика, основанного на использовании светового луча, может служить схема на рис. 11.34. Этот датчик предназначен для многодиапазонной (селективной) сортировки деталей по размерам и в частном случае для разбраковки. В зависимости от контролируемого размера детали 1 зеркальце 4, поворачиваясь, направляет отраженный световой луч от источника излучения 5 на один из фоточувствительных элементов 6, преобразующих свет в электрический ток, воздействующий на соответствующий электронный усилитель 7 (фотоэлектрический преобразователь). С выхода каждого электронного усилителя снимается сигнал, воздействующий на соответственный исполнительный элемент 8 (например, световой сигнал или поворотное сортирующее устройство). В рассматриваемом частном случае показано пять фоточувствительных элементов и соответственно пять исполнительных элементов («+», 1, 2, 3 и «-»). Промышленность выпускает датчики с фотоэлектрическими преобразователями, предусматривающие 10, 20, 30, 40 и 50 сортировоч-

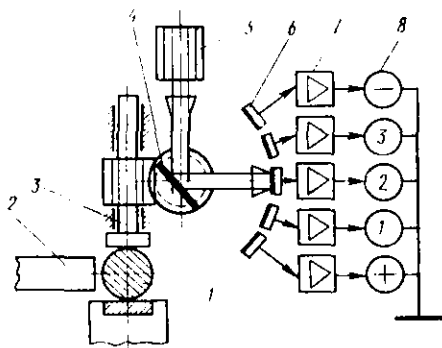


Рис. 11.34. Схема фотоэлектрического датчика для селекционной сортировки:

1 - контролируемая деталь; 2 - толкатель, устанавливающий деталь на измерительную позицию; 3 - измерительный шток; 4 - зеркальце; 5 - источник излучения; 6 - фоточувствительный элемент; 7 - усилитель; 8 - исполнительный элемент

ных групп с диапазонами сортировки от 0,5 до 5 мкм. В качестве фоточувствительных элементов применяются как фоторезисторы, так и фотодиоды. Их схематическое построение весьма разнообразно.

Рассмотренный на рис. 11.34 оптический датчик не без основания часто называется фотоэлектрическим, так как в нем используется не только световая оптика, но и известный в физике фотоэлектрический эффект, позволяющий преобразовывать световой луч в поток электрической энергии. При осуществлении фотоэлектрического датчика того типа, который изображен на рис. 11.34, фоточувствительные элементы 6 следует располагать так, чтобы зазор между ними был минимален. Световой луч должен быть по крайней мере в три раза шире упомянутого зазора, чтобы исключить возможность попадания луча в зазор между фоточувствительными элементами и тем самым вызвать ложную команду. Попадание луча одновременно на два фоточувствительных элемента совершенно неопасно, если использовать рассмотренный принцип доминирования (при перекрывании световым лучом двух фоточувствительных элементов срабатывает только одна команда).

Рассмотренный фотоэлектрический датчик является аналого-дискретным преобразователем и, следовательно, его выходная информация может соответственно вводиться в ЭВМ для управления технологическим процессом в соответствии с заданным алгоритмом.

На практике применяются многообразные фотоэлектрические датчики, предложенные различными предприятиями и отдельными авторами как в СССР, так и за рубежом (щелевые устройства, оптические решетки, дифракционные устройства и т. д.).

К важнейшим физическим параметрам деталей, с которыми приходится иметь дело и которые нередко необходимо контролировать, относятся: температура (наружная и внутренняя поверхность), деформация деталей, твердость поверхностного слоя, внутренняя структура детали, сила (например, резания), давление или упругость, частота вращения (вала, шпинделя и т. д.).

Как уже указывалось выше, контроль ряда физических параметров сводится в конечном итоге к использованию датчиков, предназначенных для контроля линейных перемещений.

В Советском Союзе проводились интересные работы по использованию *растровых систем* для измерения механических перемещений, которые включают в себя измерительный, опорный и индикаторный растры. В так называемых фазовых и фазово-импульсных фотоэлектрических системах измерения перемещений представляет широкий интерес использование различных комбинаций визуализированных бегущих ультразвуковых волн в качестве индикаторных растров. Следует заметить, что в более сложных случаях сводить контроль температуры к измерению линейного перемещения не всегда возможно. Например, при сварке металлических листов для обеспечения качественного процесса может возникнуть необходимость измерения «цветовых» тем-

ператур и формирования изотерм температурного поля на поверхности нагретого тела.

Известен способ измерения, заключающийся в проецировании изображения температурного поля нагретого тела на телевизионное устройство, формировании двух видеосигналов в различных участках спектра, фиксировании моментов равенства этих видеосигналов и формировании в эти моменты импульсов, образующих изображение изотермы за период развертки температурного поля, что может наблюдаться на экране видеоконтрольного блока (дисплея) и быть использовано для регулирования режима сварочного процесса.

Для контроля микроструктуры, качества термообработки, твердости и марки стали различных деталей используют датчики, измеряющие их магнитные свойства, к которым, в частности, относятся магнитная проницаемость, остаточная магнитная индукция и коэрцитивная сила.

Мы рассмотрим только один пример, показывающий, как можно проверить твердость детали 1 с помощью коэрцитивного датчика (рис. 11.35). Он представляет собой железный сердечник, состоящий из двух половин 2 и 7, разделенных воздушным зазором ϵ величиной 1-2 мм. Сердечник снабжен двумя обмотками: намагничивающей 1Э и размагничивающей 2Э, а также железным якорьком 6, поворачивающимся на оси 3. Общая коэрцитивная сила магнитной цепи оказывается, таким образом, функцией твердости этого участка.

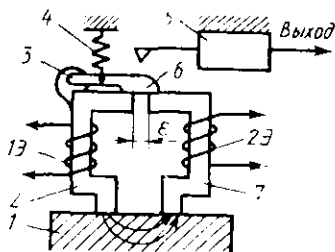


Рис. 11.35. Схема коэрцитивного датчика

Порядок контроля твердости состоит в следующем (по программе):

1. Включение постоянного тока в обмотку 1Э; при этом якорек 6 подтягивается к сердечникам, замыкая магнитную цепь.
2. В цепь обмотки 2Э подается размагничивающий ток, который принудительно постепенно возрастает, начиная от значения, равного нулю.
3. По мере возрастания тока в обмотке 2Э происходит падение остаточной индукции в сердечнике коэрцитивного датчика. В момент, когда эта остаточная индукция достигает значения, близкого к нулю, якорек 6 отрывается под действием пружины 4, что фиксируется специальным датчиком 5. Ток в обмотке 2Э, соответствующий отрыву якорька, определяет величину коэрцитивной силы исследуемой детали, т. е. ее твердость (при прочих равных условиях формы, микроструктуры, температуры и пр.).

§ 11.5. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

В настоящее время большую актуальность приобрело создание быстродействующих автоматических устройств, способных измерять многочисленные параметры деталей или заготовок непосредственно в про-

изводственном потоке. В связи с этим возникает необходимость непрерывного расширения номенклатуры датчиков и измерительных преобразователей. Перспективно в этом отношении использование и применение микропроцессорной техники и микроЭВМ, отличающихся весьма малыми размерами, высокой надежностью и стабильностью. Так, например, одним из необходимых компонентов системы повышения качества изготовления станков с ЧПУ являются автоматизированные испытательные комплексы, обеспечивающие проведение широкого круга проверок.

В СССР создан автоматизированный испытательный комплекс, который позволяет осуществлять в автоматизированном режиме ряд важнейших проверок параметров станков главным образом токарной группы, в состав которых входят прямолинейность перемещения суппорта относительно оси шпинделя, радиальное и торцовое биение шпинделя, точность линейного позиционирования и дискретных перемещений, стабильность установки инструмента при его автоматической смене, проверка шумовых характеристик и т. д.

Отличительная особенность комплекса — автоматический сбор данных измерений благодаря стыковке электронных измерительных приборов с микроЭВМ, диалоговому режиму испытаний, оперативному получению документов с результатами испытаний. При проведении испытаний на станке устанавливают контрольно-измерительную оснастку и датчики. Рабочие органы станка перемещаются в соответствии с управляющей программой. Датчики соединены с приборами, размещенными в приборных модулях, где формируются электрические измерительные сигналы, поступающие на входы вычислительного модуля. Координатно-измерительный комплекс обеспечивает сокращение времени испытаний примерно в 10 раз при одновременном повышении объективности и достоверности результатов испытаний.

В качестве датчика, предназначенного для измерения длин, углов и скоростей, известно, в частности, применение лазерной системы, отличающейся высокой степенью точности и относительно большими пределами измерения. Благодаря использованию лазерного луча система может успешно применяться для периодической проверки средств измерения и узлов позиционирования, а также в случае, когда доступ к объекту измерения затруднен. Лазерный луч, создаваемый стабилизированным по частоте гелий-неоновым лазером, разделяется блоком интерферометра на два пучка. Один пучок используется как измерительный, а другой — как опорный.

Развитие координатно-измерительных машин (КИМ) открыло возможность контроля *методом обегания*, при котором обеспечивается измерение детали не только в заданном сечении, но и сплошь по всему объему или длине (иначе говоря, в нескольких сечениях), при этом во многих случаях желательна бесконтактность контроля, т. е. контроль без непосредственного соприкосновения измерительных элементов с деталью. Вполне допустимо применение метода обегания путем непосредственного соприкосновения чувствительных элементов с по-

верхностью детали, с использованием как электроконтактных, так и индуктивных датчиков.

Для изделий сложной конфигурации при контроле или измерении большого числа различных параметров, для крупногабаритных деталей в ряде случаев может быть рекомендовано применение *координатно-измерительных приборов и машин*, получивших название КИМ. Применение КИМ оказывается весьма экономичным для контроля таких деталей, как пресс-формы, блоки цилиндров двигателей, коробки передач, коллекторы, задние мосты автомобилей, корпусные детали, арматура, штампы и т. д. Вполне перспективно применение КИМ непосредственно на технологическом оборудовании в процессе обработки деталей или в промежутке после обработки.

В информационную систему КИМ можно вводить данные чертежа детали и таким путем создавать корректирующую программу по данным измерениям обрабатываемых деталей. Для выполнения большого количества измерительных задач в комплекты КИМ могут входить: поворотные столы для угловых измерений, многоточечные измерительные щупы, микроЭВМ, цифровые печатающие устройства, дисплеи, самопишущие устройства, микроскопы, проекторы и т. д. По ряду оценок КИМ позволяют контролировать до 95 % деталей машиностроения.

В ряде случаев КИМ в автоматическом режиме обходит исследуемый объект и распознает его форму независимо от его расположения и ориентации в рабочем пространстве. В течение одной минуты КИМ в состоянии проконтролировать 20 точек детали и более.

§ 11.6. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЕВИЗИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Это новое техническое направление сравнительно недавно (1956) возникло в Советском Союзе и получило название «телевизионно-вычислительная техника». Изложение сущности телевизионно-вычислительного метода начнем с рассмотрения телевизионно-вычислительного датчика.

Следует отметить, что многие операции контроля изделий решаются с помощью проекционных методов, путем проецирования контура детали на плоский экран в увеличенном масштабе. Телевизионно-вычислительная техника позволяет, по сути дела, решать задачу автоматизации проекционных методов контроля.

Перспективность телевизионно-вычислительной техники заключается в возможности создания быстродействующих контрольно-измерительных устройств, во многих случаях не требующих непосредственного соприкосновения с контролируемыми изделиями, при одновременном получении большого количества информации о данном объекте за короткий промежуток времени.

Контрольный процесс здесь сводится к проецированию контролируемого объекта (детали) на фоточувствительный слой телевизионной

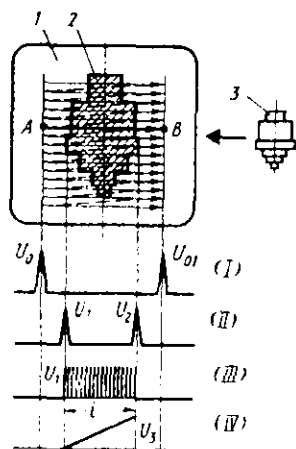
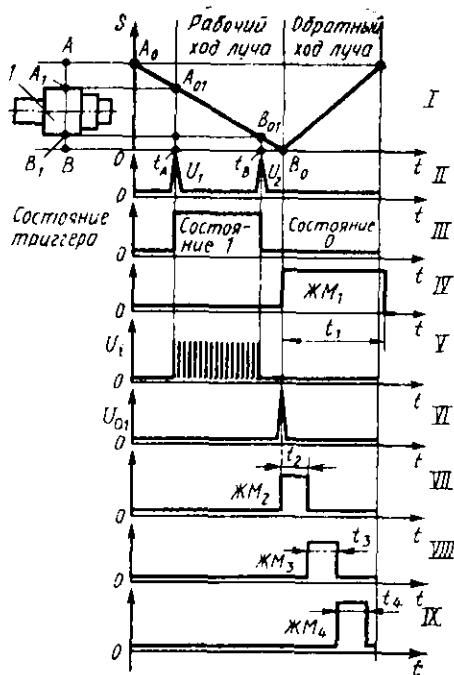


Рис. 11.36. Принципиальная схема применения телевизионно-вычислительной техники для автоматического контроля

Рис. 11.37. Графическое пояснение преобразования информации с помощью телевизионно-вычислительной техники



трубки с последующим преобразованием видеосигналов в число-импульсные коды, характеризующие размеры, геометрическую форму, температуру и прочие параметры этого объекта. Принцип такого преобразования иллюстрируется на рис. 11.36. На фоточувствительный слой телевизионной трубки 1 спроецирована в соответствующем масштабе тень 2 контролируемой детали 3 (здесь ступенчатый валик). В качестве телевизионной трубки можно использовать либо видикон, либо диссектор, либо соответствующего назначения полупроводниковые устройства.

Под воздействием строчной и кадровой отклоняющих систем электронный луч трубки последовательно пересекает тень в надлежащих сечениях (например, в сечении AB). В момент входа луча в тень детали, на выходе соответствующего звена преобразовательного тракта системы возникает импульс напряжения U_1 (график II на рис. 11.37). С этого момента вступает в действие некоторый генератор импульсов U_i (график III), импульсы которого поступают в специальный электронный счетчик-регистр. При выходе электронного луча из тени детали упомянутое выше звено системы выдает второй импульс U_2 , который используется для прекращения ввода импульсов генератора в счетчик. Число i импульсов генератора, уложившихся в промежуток времени между импульсами U_1 и U_2 , пропорционально (с некоторой погрешностью) размеру детали в данном сечении.

Если скорость перемещения электронного луча и частота генератора строго стабилизированы, а сферическая абберрация проецирующей оптики и размер электронного пятна пренебрежимо малы, то всегда имеет место систематическая погрешность, определяемая дискретностью измерительного процесса (частотой генератора импульсов).

В некоторых случаях для автоматизации контроля и управления приходится использовать вспомогательные импульсы U_0 и U_{01} (график I), которые возникают в момент реверса сканирующего электронного луча телевизионной трубки.

На рис. 11.37 представлена графическая схема, поясняющая процессы образования и хранения информации о размерах контролируемого сечения детали, а также передачи результатов контроля в вычислительно-логический блок управления исполнительными органами для случаев активного или пассивного автоматического контроля. Здесь I — контролируемая деталь (в сечении A_1B_1).

Перемещение s электронного луча в функции времени изображено на графике I (прямая A_0B_0). Каждый цикл сканирования состоит из рабочего и обратного ходов. Точка A_{01} соответствует точке A_1 входа луча в тень, а точка B_{01} — точке B_1 выхода луча из тени. Возникшие на выходе телевизионной трубки импульсы U_1 и U_2 входа и выхода после усиления и преобразования поступают на счетный вход триггера.

Напомним, что триггер представляет собой электронный логический элемент, который может находиться в двух устойчивых состояниях. Переход из одного состояния в другое происходит под действием одного из входов S , C и R . Если подать кратковременный потенциал на вход S , то триггер займет определенное заданное состояние (например, первое). Если подать кратковременный потенциал на вход R , то триггер займет противоположное состояние, т. е. второе. Особое название имеет вход C . Этот вход называется *счетным*. Подавая на вход C в последовательном порядке кратковременные импульсы, триггер соответственно можно переводить из первого состояния во второе, далее из второго в первое, затем опять во второе и т. д.

Обращаемся вновь к схеме на рис. 11.37. Как видно из графиков II и III , импульс U_1 переводит триггер в состояние I , а импульс U_2 — в состояние 0 (в моменты времени соответственно t_A и t_B). В состоянии I триггер действует на электронный ключ (типа рассмотренного на рис. 11.37), который пропускает импульсы U_i от генератора к электронному счетчику (на рис. 11.37 этот счетчик не показан). Импульс U_2 вновь переводит триггер в состояние 0 , и подача импульсов U_i на электронный счетчик прекращается (график V). Набранное в электронный счетчик число импульсов соответствует контролируемому размеру A_1B_1 .

В зависимости от технических требований набранное число импульсов можно передавать либо в управляющую ЭВМ, либо на сигнальное устройство (дисплей), показывающее результаты измерения или срав-

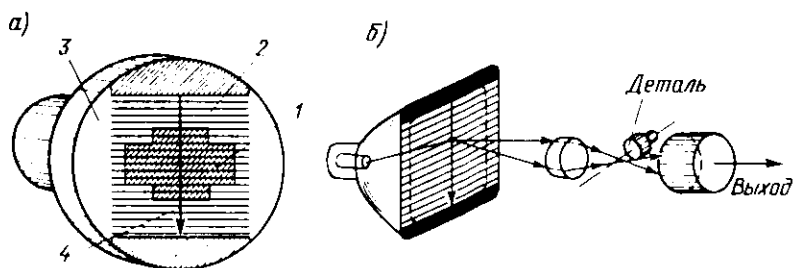


Рис. 11.38. Растровый метод преобразования информации

нивающего его с допусками заранее по программе вводимыми в систему.

В момент реверса электронного луча на выходе определенного импульсного трансформатора образуется синхроимпульс U_0 (график V/I), который используется для запуска серии ждущих мультивибраторов, которые переводят измерительную систему в исходное состояние перед выполнением очередного измерительного цикла, при этом: а) ставятся на нуль показания электронного счетчика; б) подается контрольная команда на триггер (график III) для гарантии его установки также на нуль. Через промежуток времени t_3 задний фронт выходного потенциала ЖМ₃ запускает ждущий мультивибратор ЖМ₄ (время t_4 , график IX). Последний используется для ввода в систему по установленной программе очередного числа, характеризующего пределами $I_{\max}$ и $I_{\min}$ следующего контролируемого сечения детали. Переход системы с контроля одного сечения на контроль другого можно осуществить перемещая контролируемую деталь относительно телевизионной трубки или используя вторую составляющую отклонения электронного луча по соответствующей программе.

Микропроцессорная техника позволяет информацию о размерах каждого контролируемого сечения вводить в соответственный электронный счетчик-регистр и таким образом осуществить запоминание всех данных о результатах измерения и далее преобразовывать с помощью соответствующих шифраторов их в десятичные числа и выводить на экран дисплея.

Одним из эффективных путей предотвращения погрешностей контроля, вызванных нестабильностью генератора измерительных импульсов и нелинейностью развертки, является применение полосовых растров. Сущность растрового метода поясняется на рис. 11.38. Контролируемая деталь в виде тени I (рис. 11.38, а), проецируется с помощью световых лучей и соответствующей оптики на фоточувствительный слой телевизионной трубки 3. Перед поверхностью проецирования устанавливается плоский растр 2, который представляет собой чередующиеся прозрачные и непрозрачные полосы, расположенные перпендикулярно линии рабочего хода электронного луча 4. В процессе пере-

мещения луча 4 на выходе трубки создается серия электрических импульсов, следующих друг за другом. Число их на каждый рабочий ход определяется размером контролируемой детали. Такая модуляция светового луча не требует наличия специального генератора импульсов и, кроме того, результаты измерения не зависят от неравномерности скорости перемещения электронного луча.

На принципе растровой модуляции световых лучей основано преобразование размера детали способом «бегущего луча», при котором телевизионная трубка заменяется фоточувствительным логическим элементом, например фотоумножителем, а в качестве источника светового излучения используется телевизионный кинескоп (рис. 11.38, б). Кинескоп здесь используется в качестве точечного источника света, способного быстро и безынерционно перемещаться по поверхности люминофора (вещество, светящееся под воздействием электронного луча). Следует особо отметить, что телевизионно-вычислительный метод измерения и контроля является весьма действующим, так как частота сканирования электронного луча может составлять сотни и тысячи герц. Это обстоятельство может быть использовано для существенного снижения погрешностей контроля размеров отдельных сечений деталей.

Для этого рекомендуется многократно контролировать каждое из сечений. При этом требуется решить задачу программного управления сканированием луча, как это условно пояснено на рис. 11.39.

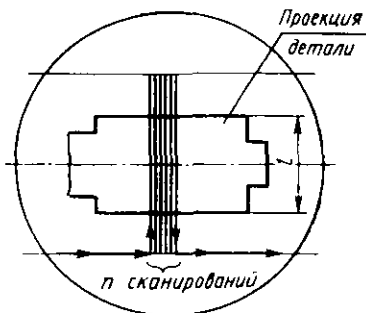


Рис. 11.39. Принцип многократного контроля размера

§ 11.7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Развитие средств автоматического контроля в значительной мере способствует созданию и внедрению в производство усовершенствованного технологического оборудования. Отличительной особенностью такого оборудования является переход от использования отдельных рабочих машин к созданию и внедрению комплексных автоматических систем, охватывающих производственный процесс, включающий информационно-управляющие, транспортные и погрузочно-разгрузочные операции. Если прежде автоматический контроль использовался главным образом для отбраковки негодной продукции или предупреждения возможности брака, то теперь он становится важнейшим средством автоматического управления производственными процессами, включающими в себя адаптацию технологических режимов в целях оптимизации экономических затрат.

Адаптация или, иначе, автоматический выбор оптимальных технологических режимов в ходе производственного процесса, возлагается

на быстродействующие управляющие вычислительные машины (ЭВМ), на вход которых поступает информация от автоматических измерительных устройств. При этом во многих случаях желательна бесконтактность контроля, т. е. контроль без непосредственного соприкосновения измерительных элементов с деталью. О путях решения задач бесконтактности контроля уже говорилось в предыдущих параграфах.

Представление о комплексной системе автоматического контроля, отвечающей требованиям полной автоматизации поточных линий в машиностроении, дает структурная схема производственного процесса с автоматической оптимизацией, приведенная на рис. 11.40. Из рис. 11.40 видно, что заготовка (или группа заготовок), подлежащая обработке, проходит через позицию предварительного контроля (проверки), на которой выявляются все ее важнейшие технические характеристики и параметры, необходимые для установления оптимального режима обработки. Таким образом, еще до входа на позицию (зону) обработки в линии должны быть установлены автоматические контрольно-измерительные устройства, выдающие предварительную информацию о параметрах очередной заготовки. Эта информация должна поступать в управляющую микроЭВМ. К упомянутым контрольным устройствам предварительной информации должны быть предъявлены определенные требования, главные из которых:

способность преобразования измерительных непрерывных величин в числовую (импульсную) информацию;

информация, поступающая с позиции *I* предварительного контроля, с помощью микроЭВМ позволяет установить оптимальные режимы для обработки и запомнить их на некоторый период времени, необходимый для завершения исполнения обработки предшествующей детали и ввода на позицию (зону обработки) очередной проконтролированной детали (заготовки).

Передача заготовок в зону обработки выполняется уже известными транспортирующими устройствами.

Как показано на структурной схеме рис. 11.40, такая задача может быть возложена на промышленный робот (P_1), который одновременно выполняет отбраковку (удаление из потока) негодных заготовок. В зоне обработки предусматривается и автоматический контроль *II*, задача которого — активное вмешательство в ход производственного процесса (автоматическое регулирование режимов обработки, переключение режимов, проверка состояния режущего инструмента и т. д.). Информация, поступающая с автоматических измерительных устройств *II*, также должна носить число-импульсный и быстродействующий характер.

После выхода изделия из зоны обработки (робот P_2) оно во многих случаях должно быть подвергнуто контролю (проверке), назначение которого — выдача дополнительной информации на подналадку или корректировку процесса обработки уже для последующих изделий, поступающих в зону обработки. Выполняющие такую функцию автоматические контрольно-измерительные устройства *III* также должны

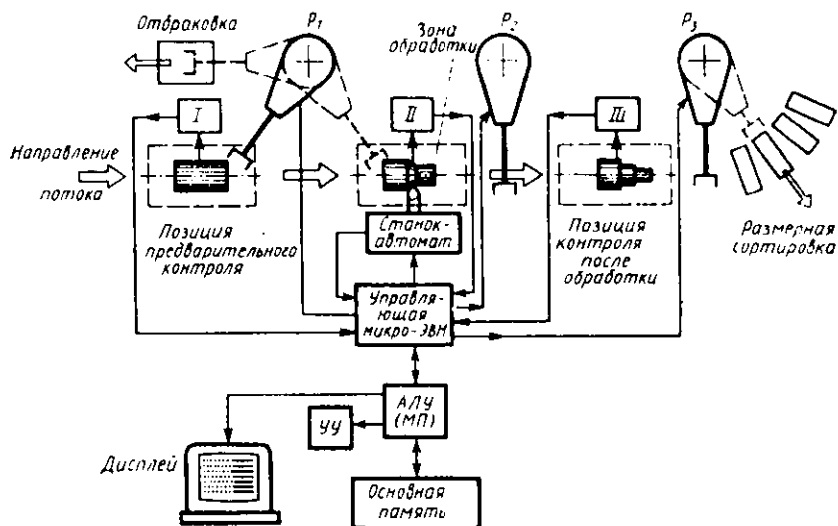


Рис. 11.40. Структурная схема производства с автоматическим управлением с помощью информационно-управляющего комплекса

выдавать число-импульсную информацию, поступающую в управляющую микроЭВМ. Однако к этим устройствам *III* предъявляются дополнительные требования. Они должны выдавать информацию, образующуюся в результате надлежащей статистической обработки данных измерений изделий, сошедших с позиции обработки. Такой вид автоматического контроля важен не только при решении вопроса подналадки, связанной с износом режущего инструмента, но и при решении вопросов автоматической смены или переточки режущего инструмента, а также поднастройки контрольно-измерительных устройств.

На позиции последующего контроля может производиться и размерный контроль, и селекционная сортировка деталей по диапазонам допуска, что сможет выполнять промышленный робот P_d наряду с передачей изделия на последующую позицию обработки.

Таким образом, автоматизация технологического процесса сопровождается многочисленной циркуляцией информации, стекающей в центральный орган управления станка-автомата. Решение подобной задачи существенно облегчается, если использовать микропроцессорную технику. Наряду с информацией о ходе производственного процесса в этот орган управления должно поступать производственное задание в виде информации от устройства программного управления.

На рис. 11.40 соответственно обозначено: *МП* — микропроцессор, главной составляющей частью которого является арифметическо-логическое устройство *АЛУ*, выполняющее необходимые расчетные операции на основании определенных математических констант, ха-

рактизирующих данный технологический процесс. По этим константам МП выполняет операции корректировки хода технологического процесса путем сравнения их с показаниями датчиков и измерительных преобразователей, образующих информацию о фактическом ходе технологического процесса.

Последовательностью действий АЛУ управляет импульсное устройство управления (УУ).

В результате анализа комплексной системы автоматического контроля и управления ходом производственного процесса (рис. 11.40) можно сделать вывод о возрастающей роли промышленных роботов самых разнообразных типов и назначений.

Кроме операций транспортировки изделия они выполняют операции ввода изделий (заготовок) на позицию обработки и снятия обработанной детали. Они выполняют также селекционную сортировку и адресование деталей по командам контрольно-измерительных устройств. Если, например, контрольно-сортировочный автомат дополнить роботом, подающим в него контролируемые детали, и роботом, собирающим отсортированные детали и направляющим их на последующие операции, то мы, по сути дела, создадим робот — контролер. В настоящее время все большее распространение получают системы технического зрения промышленных роботов, которые определяют положение деталей (заготовок), их ориентацию в соответственном накопителе, совмещают этот процесс с автоматическим контролем и определяют при этом координаты незаполненных ячеек в спутниках станков и даже могут задавать программу обработки заготовок в зависимости от их типа.

В опубликованном в печати в 1987 г. описании промышленного робота с техническим зрением применены две телевизионные камеры, одна из которых закреплена на руке робота, а другая неподвижно на соответствующей стойке. В поле зрения этой камеры попадает вся поверхность спутника и на основании поступающей с нее информации анализируется заполненность его заготовками, которые одновременно распознаются по геометрическим параметрам. Первая же телевизионная камера предназначена для воспроизведения крупномасштабного изображения заготовки и уточнения ее положения в спутнике.

Анализ информации, поступающей с телевизионных камер, позволяет точно подвести схват робота для снятия заготовки. Конструктивно система технического зрения выполнена в виде малогабаритной телевизионной установки со сменными оптическими устройствами, а все электронные схемы размещены на одной печатной плате размером 135 × 240 мм. Для обработки информации в системе технического зрения используется та же микроЭВМ для управления роботом по заданной программе.

Если руководствоваться структурной схемой рис. 11.40, то можно сделать вывод о том, что от состояния техники автоматического контроля в существенной мере зависит быстрейшая реализация идей полной автоматизации и оптимизации производственных процессов.

Список рекомендуемой литературы

1. Автоматические линии в машиностроении. Справочник. Т. 1, 2, 3 / Под общ. ред. А. И. Дащенко. М., 1984—1985.
2. Автоматизация дискретного производства / Под ред. Е. И. Семенова и Л. Н. Волчкевича. — М.; София: Техника, 1987. — 375 с.
3. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Под ред. Ю. М. Соломенцева и В. Г. Митрофанова. М., 1986. — 255 с.
4. Автоматизированное проектирование технологических процессов в машиностроении: Под ред. Н. М. Капустина. М., Берлин: Техника, 1985. — 304 с.
5. Автоматизация процессов в машиностроении. А. П. Белоусов, А. И. Дащенко, П. М. Полянский, А. В. Шулешкин. М., 1973. — 455 с.
6. Васильев В. Н. Организация, управление и экономика гибкого интегрированного производства в машиностроении. М., 1986. — 312 с.
7. Волчкевич Т. И., Кузнецов М. М., Ковалев М. П. Комплексная автоматизация производства. М., 1989. — 298 с.
8. Механизация и автоматизация сборочных процессов в машиностроении / В. С. Гановский, И. К. Бояджиев и др. — София: Техника, 1986. — 250 с.
9. Гибкие сборочные системы: Пер. с англ. Под ред. Хегинботам. М., 1988. — 400 с.
10. Дащенко А. И., Белоусов А. П. Проектирование автоматических линий. М., 1984. — 374 с.
11. Дащенко А. И., Ламин И. Н., Золотаревский Ю. М. Технологические основы агрегатирования сборочного оборудования. М., 1990.
12. Корсаков В. С. Автоматизация производственных процессов. М., 1978. — 295 с.
13. Козырев Ю. Г. Промышленные роботы: Справочник. М., 1983. — 376 с.
14. Лебедевский М. С., Вейц В. Л., Федотов А. И. Научные основы автоматической сборки. Л., 1985. — 315 с.
15. Металлорежущие станки и автоматы: Учеб. для машиностроительных вузов. Под ред. А. С. Проникова. М., 1981. — 479 с.
16. Научные основы прогрессивной техники и технологии. М., 1983. 375 с. 1985, 375 с.; 1986, 373 с.
17. Проектирование оптимальных технологических систем машин. Под ред. Я. Я. Буды и А. И. Дащенко. М., Братислава: 1989. — 286 с.
18. Промышленные роботы. Внедрение и эффективность: Пер. с япон. М., 1987. — 382 с.
19. Системное проектирование интегрированных производственных комплексов. Под ред. В. М. Пономарева. Л., 1986. — 318 с.
20. Управление гибкими производственными системами. Модели и алгоритмы: Под ред. С. В. Емельянова. М., Берлин, 1987. — 364 с.
21. Динамика управления роботами / Под ред. Е. И. Юревича. М., 1984.
22. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляторные роботы: динамика и алгоритмы. М., 1978.
23. Вейц В. Л., Коловский М. З., Кочура А. Е. Динамика управления машинных агрегатов. М., 1984.
24. Расчет и проектирование элементов робототехнических систем с учетом динамических воздействий. Н. В. Кирсанова, Л. С. Трофимовская, Е. Е. Чаадаева и др. Л., 1984.
25. Герц Е. В., Крейнин Г. В. Расчет пневмоприводов. М., 1975.

Оглавление

Предисловие	3
Введение	4
РАЗДЕЛ I	
АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ И СИСТЕМЫ МАШИН ДЛЯ МАССОВОГО МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Глава 1. Типы автоматических систем машин, их классификация и структура	8
Глава 2. Агрегатно-модульный принцип построения оборудования для обработки деталей и сборки изделий	14
Глава 3. Основные направления в проектировании автоматических линий массового производства	35
§ 3.1. Разработка теории надежности и методов структурного анализа АЛ	38
§ 3.2. Разработка теории оптимальной концентрации операций технологических процессов и оптимизации структурно-компоновочных схем АЛ	41
§ 3.3. Разработка теории и методов расчета параметров функциональных механизмов и устройств АЛ	46
§ 3.4. Вопросы теории эффективной эксплуатации АЛ	47
Глава 4. Основы проектирования технологических процессов и выбора структурно-компоновочных схем систем машин	53
§ 4.1. Требования к технологичности конструкций деталей и узлов машин	53
§ 4.2. Выбор оптимальных структурно-компоновочных схем станков-автоматов и автоматических линий	56
§ 4.3. Оптимальное агрегатирование сборочных машин и линий для массового и серийного производства	122
Глава 5. Методы статистического моделирования технологических систем машин	145
§ 5.1. Этапы и задачи моделирования станочных линий	145
§ 5.2. Моделирование блокированных (синхронных) линий	146
§ 5.3. Моделирование несинхронных сборочных линий	170

РАЗДЕЛ 2

ГИБКОЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО И СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глава 6. Системный характер гибкого автоматизированного производства	181
§ 6.1. Простые и сложные системы	181
§ 6.2. Свойства и поведение систем	183
§ 6.3. Структура производственных систем	185
§ 6.4. Программная универсализация управления гибким автоматизированным производством	193
§ 6.5. Групповая технология в области гибкого автоматизированного производства	231
§ 6.6. Гибкость производственных систем	237
Глава 7. Технические элементы и подсистемы гибкого автоматизированного производства	240
§ 7.1. Современные двигательные модули с ЧПУ	240
§ 7.2. Станки и машины с ЧПУ	246
§ 7.3. Гибкие транспортные системы	257
Глава 8. Производственные ячейки и гибкие производственные системы	265
§ 8.1. Рекуррентный принцип формирования производственных структур	265
§ 8.2. Производственные ячейки для изготовления полуфабрикатов	269
§ 8.3. Роботизированные системы для точечной контактной сварки	273
§ 8.4. Роботизированные системы для дуговой электросварки	282
§ 8.5. Роботизированные системы для поверхностной обработки	294
§ 8.6. Гибкие производственные системы для изготовления деталей	300
§ 8.7. Системы безопасности в области автоматизированного производства	324
§ 8.8. Создание заводов будущего	328

РАЗДЕЛ 3

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Глава 9. Проектирование и применение промышленных роботов	343
§ 9.1. Классификация и области применения промышленных роботов	343
§ 9.2. Модульный принцип конструирования	351
§ 9.3. Приводы промышленных роботов	355
§ 9.4. Основные принципы построения автоматизированных рабочих мест с применением промышленных роботов	357
§ 9.5. Системный подход при внедрении роботов. Выбор и методы оценки оптимального варианта	364
Глава 10. Теория расчета промышленных роботов	372
§ 10.1. Структура и кинематика промышленного робота	372
§ 10.2. Динамика манипуляторов	389
Глава 11. Автоматический контроль в машиностроении	
§ 11.1. Технический контроль как один из важнейших регуляторов качества технологического процесса	426

§ 11.2. Методы автоматизации контроля	434
§ 11.3. Типовые схемы построения автоматических контрольных устройств	442
§ 11.4. Датчики как первичные измерительные преобразователи систем электроавтоматического контроля	454
§ 11.5. Координатно-измерительные машины	457
§ 11.6. Автоматический контроль с помощью телевизионно-вычислительной техники	469
§ 11.7. Автоматические информационно-управляющие системы	473
Список рекомендуемой литературы	477

Учебное издание

Буда Ян. **Гановски** Владимир. **Вихман** Виктор Семесович.
Дашенко Анатолий Иосифович. **Божков** Виктор Пантелеймонович.
Божкова Леонарда Викентьевна

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Зав. редакцией *Н. И. Хрусталева*. Редактор *В. И. Милешин*.
Мл. редакторы *Г. Г. Бучина, Н. Е. Овчеренко*.
Художник *Ю. Д. Федичкин*. Художественный редактор *Т. М. Скворцова*.
Технический редактор *Г. А. Фетисова*. Корректор *В. В. Кожуткина*

ИБ № 9249

Изд. № СТД-674. Сдано в набор 11.05.90. Подписано в печать 04.01.91.
Формат 60X88 1/16. Бум. офс. № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная.
Объем 29,40 усл. печ. л. + 0,25 усл. печ. л. форзацы. 29,89 усл. кр.-отт. 31,79 уч. изд. л. +
+ 0,36 уч. изд. л. форзацы. Тираж 11 500 экз. Зак. № 316. Цена 1 р. 70 к.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 4 Госкомпечати СССР
[29041, Москва, Б. Переяславская ул., 46]