

**О. П. ИЛЬИН
Н. И. КОЗЛОВСКИЙ
Ю. Н. ПЕТРЕНКО**

СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ УСТАНОВКАМИ И РОБОТО- ТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Допущено Министерством
народного образования БССР
в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по специальностям
"Электропривод и автоматизация промышленных
установок и технологических комплексов"
и "Робототехнические системы и комплексы"

ББК 32.965.7я73

И46

УДК 681.51+621.865.8] (075.8)

Рецензенты: кафедра автоматизированного привода Московского авиационного института и доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Одесского политехнического института *А.М. Корытин*

Ильин О.П. и др.

И46 Системы программного управления производственными установками и робототехническими комплексами: Учеб. пособие для вузов / О.П. Ильин, К.И. Козловский, Ю.Н. Петренко. — Мн.: Выш. шк., 1988. — 285 с.: ил.

ISBN 5-339-00020-6.

Рассматриваются основные тенденции развития систем автоматического управления технологическим оборудованием, выявляется значение систем программного управления и робототехнических комплексов в современном автоматизированном производстве. Исследуются типы робототехнических комплексов, системы электроприводов, системы ЧПУ с индивидуальной ЭВМ.

Для студентов вузов специальностей "Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов" и "Робототехнические системы и комплексы".

2402010000-132

И М304 (03) -88 21-88

ББК 32.965.7я73

ISBN 5-339-00020-6

© Издательство "Вышэйшая школа", 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Техническое перевооружение народного хозяйства, переход его на ускоренный путь развития на базе новейших достижений научно-технического прогресса приводят к необходимости решения сложных задач комплексной автоматизации, создания гибких автоматизированных производств.

В Основных направлениях экономического и социального развития страны на 1986—1990 годы и на период до 2000 года важная роль в решении этих задач отводится широкому внедрению многооперационных станков с программным управлением, робототехнических комплексов машин и оборудования со встроенными средствами микропроцессорной техники и гибких автоматизированных производств на их основе. Перечисленные задачи решаются на основе программного управления, системный подход к которому позволяет выявить основные структурные элементы, применимые для автоматизации самого широкого класса объектов — от лунохода до литейной машины.

Развитию принципов программного управления в последние годы и в ближайшей перспективе способствует всеобщая компьютеризация научных исследований, проектирования и промышленного производства.

В последние годы появился ряд изданий, посвященных различным аспектам систем программного управления. Разбросанность изложения отдельных вопросов приводит к острой потребности в учебной литературе по этой тематике.

Данное учебное пособие предназначено для студентов специальностей "Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов" и "Робототехнические системы и комплексы". Оно может быть полезно и студентам других специальностей, изучающим вопросы автоматизации. Отражение в пособии широкого комплекса вопросов, касающихся систем программного управления, при ограниченном его объеме потребовало краткого и лаконичного изложения ряда тем.

Главы 1—5, 10 написаны Ю.Н. Петренко, главы 6, 8 — О.П. Ильиным, главы 7, 9 — К.И. Козловским, глава 11 написана авторами совместно.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам доктору технических наук, профессору А.М. Корытину и коллективу кафедры автоматизированного привода МАИ (заведующий кафедрой кандидат технических наук, доцент В.Г. Стеблецов) за ценные замечания, которые способствовали улучшению учебного пособия.

Все отзывы и пожелания просим присылать по адресу: 220048, Минск, проспект Машерова, 11, издательство "Вышэйшая школа".

Авторы

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЛ	– автоматическая линия
АЛУ	– арифметико-логическое устройство
АРМ	– автоматизированное рабочее место
АСНИ	– автоматизированная система научных исследований
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
АЭП	– автоматизированный электропривод
БА	– блок автоматики
БВП	– блок ввода программы
БД	– блок декодирования
БЗ	– блок задержки
БЗП	– блок задания программы
БЗС	– блок задания скорости
БИС	– большая интегральная схема
БО	– блок оптронов
БП	– блок памяти
БТК	– блок технологических команд
БУП	– блок управления приводом
БФС	– блок формирования скоростей
БЦК	– буквенно-цифровой код
ВЗУ	– внешнее запоминающее устройство
ВТ	– вращающийся трансформатор
ВТУ	– видеотерминальное устройство
ГАЗ	– гибкий автоматизированный завод
ГАЛ	– гибкая автоматизированная линия
ГАМ	– гибкий автоматизированный модуль
ГАП	– гибкое автоматизированное производство
ГАУ	– гибкий автоматизированный участок
ГАЦ	– гибкий автоматизированный цех
ГТИ	– генератор тактовых импульсов
ДНФ	– дизъюнктивная нормальная форма
ДОС	– датчик обратной связи
ДОЧ	– делитель опорной частоты
ДЧ	– делитель частоты
ДЧК	– делитель частоты координат
ЗУ	– запоминающее устройство
ИДП	– импульсный датчик перемещения
ИЗ	– импульсы задержек
ИМ	– импульсный модулятор
ИО	– импульсы обработки
ИР	– измеритель рассогласования
ИС	– интегральная схема
ИФП	– импульсный фазовый преобразователь
КГШП	– кривошипный горячештамповочный пресс
КДП	– кодовый датчик положения
КМО	– комплекс математического обеспечения

ЛВС	– локальные вычислительные сети
ЛК	– линейный коммутатор
ЛПД	– литье под давлением
МAB	– модуль аналогового ввода
MBB	– модуль ввода-вывода
МГ	– магнитная головка
МИС	– малая интегральная схема
МК	– микрокоманда
МЛ	– магнитная лента
МО	– математическое обеспечение
МПА	– микропрограммный автомат
МПИ	– модуль последовательного интерфейса
МПП	– модуль процессора привода
МПЭ	– механический передаточный элемент
МТК	– модуль тестового контроля
МУП	– модуль управления приводом
МЦП	– модуль центрального процессора
МЭП	– модуль электропитания
ОЗУ	– оперативное запоминающее устройство
ОЛБ	– операционный логический блок
ПЗУ	– постоянное запоминающее устройство
ПК	– пульт коррекции; программируемый контроллер
ПКН	– преобразователь код–напряжение
ПЛМ	– программируемая логическая матрица
ПН	– программноноситель
ПО	– пульт оператора
ПП	– промежуточная память
ППЗУ	– перепрограммируемое запоминающее устройство
ПР	– промышленный робот
ПУ	– программное управление
ПЦУ	– пульт циклового управления
ПЧН	– преобразователь частота–напряжение
ПЭ	– пороговый элемент
РИ	– распределитель импульсов
РН	– регулятор напряжения
РО	– рабочий орган
РП	– регулятор положения
РС	– регулятор скорости
РТ	– регулятор тока
РТК	– роботизированный технологический комплекс
РШП	– разомкнутый шаговый привод
САП	– система автоматизированной подготовки
САПР	– система автоматизированного проектирования
СИС	– средняя интегральная схема
СМГ	– считывающая магнитная головка
СП	– силовой преобразователь
СС	– схема синхронизации
СУ	– система управления
УАИ	– устройство анализа информации
УВВ	– устройство ввода-вывода
УВМ	– управляющая вычислительная машина
УДЧ	– управляемый делитель частоты

УМ	– усилитель мощности
УОС	– устройство обратной связи
УП	– управляющая программа
УСО	– устройство связи с объектом
ФД	– фазовый дискриминатор
ФИ	– формирователь импульсов
ФИО	– формирователь импульсов обработки
ФН	– формирователь напряжения
ФСУ	– фотосчитывающее устройство
ЦАП	– цифроаналоговый преобразователь
ЦДА	– цифровой дифференциальный анализатор
ЦПУ	– цикловое программное управление
ЧК	– частотный коммутатор
ЧПУ	– числовое программное управление
ШД	– шаговый двигатель
ШП	– шаговый привод
ЗЗ	– элемент задержки
ЭЛТ	– электронно-лучевая трубка
ЭП	– электропривод
ЭР	– электромагнитная редукция
ЭС	– элемент сравнения

1. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ПРОИЗВОДСТВА

1.1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Системы числового программного управления (ЧПУ) интенсивно развиваются и внедряются в промышленность лишь в послевоенный период. Решающим фактором, обеспечивающим развитие систем ЧПУ в последние десятилетия, является совершенствование ЭВМ.

Системы ЧПУ базируются на "трех китах" автоматики: 1) элементной базе и ЭВМ; 2) быстродействующем автоматизированном электроприводе, обеспечивающем воспроизведение заданных движений; 3) системах автоматизированного программирования.

Двоичный код в счетной машине впервые был применен Г.В. Лейбницем в 1674 г. Значительным событием явилось изобретение русским механиком А.К. Нартовым (1725) механического суппорта и на его основе токарного станка с силовым копированием. Использование суппорта помогло разделить единый процесс механической обработки на две составляющие: силовую, осуществляющую технологическую функцию снятия слоя металла, и информационную, позволяющую управлять силовым процессом.

Основная идея, положенная в основу *токарно-копировального станка* А.К. Нартова, заключалась в том, что изделие получали путем копирования заданного образца. Движение шупа по образцу, изготовленному мастером, передавалось режущему инструменту. Таким образом происходило силовое или механическое копирование. Образец назывался копиром или шаблоном. По этому принципу были изготовлены копировально-шлифовальные и копировально-фрезерные станки.

Копировальные станки с механическим управлением применимы при производстве небольших изделий сравнительно несложной формы. Недостаток таких станков состоит в том, что значительное усилие, передаваемое от копира ролику, снижает точность, приводит к износу копира и ограничивает область применения станков. Эти недостатки были преодолены в копировальном станке с гидромеханическим управлением, предложенным итальянским изобретателем Бонтемпи в 1900 г. Здесь механическая связь между копиром и заготовкой заменена гидравлической.

Характерная и очень важная особенность гидромеханической системы состоит в разделении силовой подачи и управляющего сигнала, создаваемого золотником. Соотношение этих величин находится в пределах 1000 и более, что позволяет выполнять копир из легкообрабатываемых материалов, повышать точность обработки вследствие меньшего износа копира. Указанный принцип лег в основу построения большого класса механизмов — сервомеханизмов (следящих систем) — электрогидравлических, электрических и т.д. В самом

деле, применяя вместо золотника подвижной электрический контакт и управляя потоком электрической энергии (вместо гидравлической), можно достичь значительного эффекта.

Характерным для копировального станка независимо от его типа является наличие копира, форма которого определяет движение рабочего органа (стола) станка. Таким образом, копир можно считать программносителем. Сложность его изготовления и потери времени при смене копира являются недостатками копировальных станков. Несмотря на это, копировальные станки нашли широкое применение, особенно в 30–40-х гг. Область их использования — обработка деталей сложной формы (лопаток турбин, лопастей гребных винтов и др.). В 1934 г. советским инженером В.С. Вихманом был предложен фотокопировальный станок, принцип действия которого заключается в следующем. Фотоэлемент, помещенный на вращающейся головке, устанавливается над чертежом и улавливает свет, отраженный от чертежа. При попадании светового луча на линию чертежа освещенность фотоэлемента уменьшается, и это используется для подачи команды суппорту на движение в обратном направлении. Таким образом, головка с фотоэлементом осуществляет слежение за линией чертежа, которая в этом случае выполняет функцию копира. Принцип фотокопирования в настоящее время используется для автоматизации подготовки цифровых программ непосредственно по чертежу, для ввода данных в ЭВМ с графиков.

Копировальный способ фрезерования широко применяется при изготовлении различных пресс-форм, объемных штампов и шаблонов. Большое разнообразие конструкторских решений, в частности в автомобильной промышленности, определяет спрос на изготовление пресс-форм. Их проектирование и изготовление носит индивидуальный характер, что контрастирует с их практическим применением. Пресс-формы оказывают решающее влияние на качество продукции, поэтому при их изготовлении требуется максимально высокая точность. Применение ЧПУ в данном случае затруднено, поскольку процесс вычерчивания трехмерной фигуры, необходимой для составления программы станка с ЧПУ, является весьма трудоемким.

Принципиально можно использовать автоматическую запись программы в цифровом виде на программноносителе при автоматическом измерении копира. Однако и такой способ из-за своей трудоемкости не нашел практического применения. Поэтому копировальные станки до сих пор успешно конкурируют со станками с ЧПУ в рассматриваемой области.

Принцип работы *копировально-фрезерного станка* показан на рис. 1.1. При движении стола 9 с копиром 4 и обрабатываемой деталью 7 в направлении оси X (влево) копировальный палец 6 ощущивает профиль копира, и его линейные перемещения в следящей головке 1 преобразуются в электрический сигнал рассогласования 2. Система управления 3 вырабатывает команду на отработку этого рассогласования с помощью электродвигателя подачи 11 по оси Z и одновременно осуществляет подачу в направлении оси X с помощью электродвигателя 5. Перемещение стола 9 и силовой головки 13 измеряется с помощью датчиков положения (на схеме показан датчик положения 8, измеряющий перемещение по оси X). Съем слоя металла производится фрезой 10, которая приводится во вращение двигателем 12, расположенным в силовой головке 13. При обработке на копировальном станке может быть обеспе-

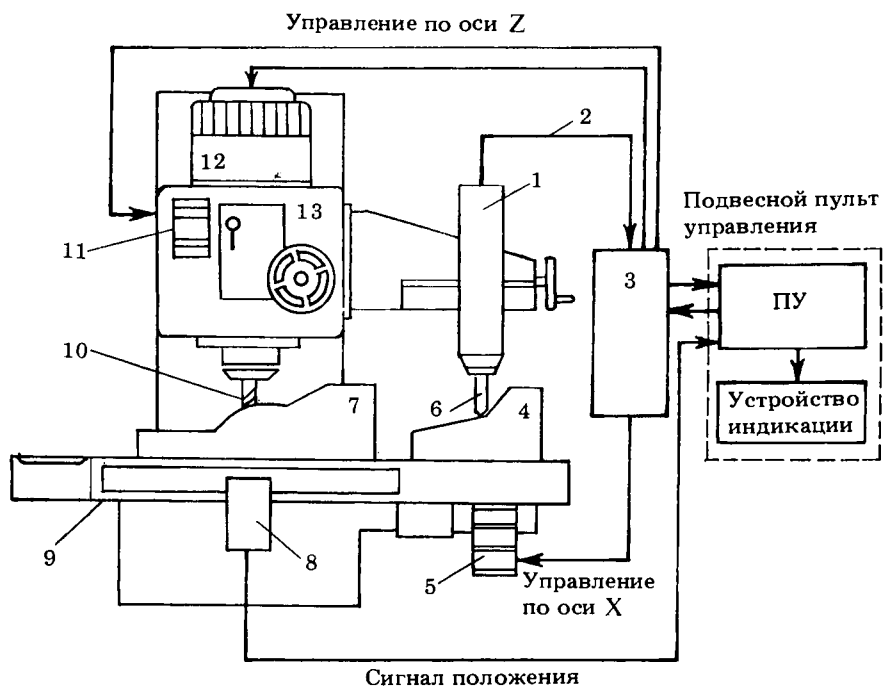


Рис. 1.1. Копировально-фрезерный станок.

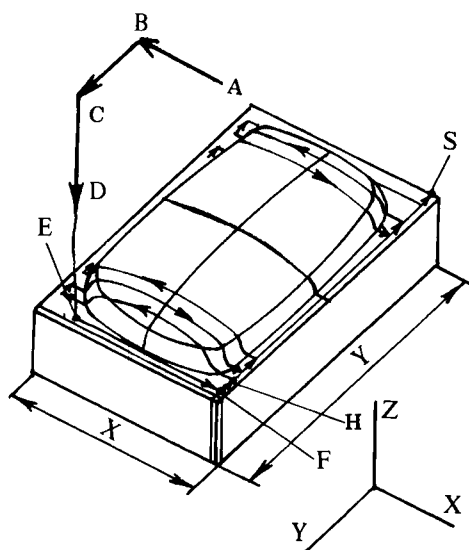


Рис. 1.2. Обработка детали на копировальном станке.

чена довольно высокая точность. Так, копировально-фрезерный станок COMMAND-X (модель FDX-125) фирмы Makino Milling Machine (Япония) имеет точность слежения 0,005 мм и обрабатывает детали массой до 3000 кг.

Пример обработки детали на копировальном станке приведен на рис. 1.2, где A — исходная точка, AB — позиционирование по оси X , BC — то же по оси Y , CD — то же по оси Z . Движения осуществляются на ускоренной подаче. В точке D привод переходит на следящую подачу; точка E — начало процесса копирования, в которой стол начинает движение по оси X (задающая подача) до точки F . Далее движение осуществляется до точки H (при выключенной подаче по оси X) приводом по оси Y (так называемая периодическая подача); в точке H происходит включение привода по оси X в обратном направлении и далее до точки S , которая является концом копирования, после чего приводами по осям X , Y , Z система устанавливается в исходное состояние.

Современные копировальные станки испытывают влияние цифровой техники и ЧПУ, что выражается в следующем. Задание координат исходной точки — точки начала копирования — осуществляется программным путем с пульта управления. Таким же образом задаются режимы обработки, вспомогательные функции (команда на вращение шпинделя, включение и выключение охлаждения и т.д.). Набор команд позволяет организовать цикл обработки и хранить его в запоминающем устройстве (ЗУ). Например, цикл сверления отверстий, расположение которых имеет матричную структуру (8 отверстий по оси X и 8 отверстий по оси Y , всего 64 отверстия), образуется с помощью лишь нескольких кадров программы. Положение рабочих органов отражается на устройстве цифровой индикации, что существенно облегчает управление станком. Имеется возможность предварительной оценки точности копира и коррекции программы движения. В дальнейшем будут решаться вопросы автоматической смены инструмента и копировального пальца, оснащения станка адаптивными системами управления режимами резания.

Можно считать, что время наибольшей популярности копировальных станков прошло. На смену им пришли станки с ЧПУ, обладающие большей гибкостью. Вернемся к числовому управлению.

В 1801 г. французским механиком Ж.М. Жаккардом был предложен автоматический ткацкий станок с управлением от перфокарт. Важность этого события заключалась в том, что появилось устройство, позволяющее фиксировать, хранить и воспроизводить информацию. Перфокарты и перфоленты в дальнейшем были использованы в вычислительной машине Ч. Бэббиджа. Систему программного управления токарным станком, основанную на принципе обучения, предложил Г.А. Спыну (АН УССР). В этой системе впервые была применена запись программы на магнитную ленту (МЛ). Когда первая деталь обрабатывалась на станке опытным оператором, коды движения рабочих органов (РО), в результате которых происходило формообразование детали, записывались в реальном масштабе времени на программноноситель — магнитную ленту. При воспроизведении программы записанные на МЛ сигналы выделялись с помощью полосовых фильтров и управляли приводами координат станка. Система была реализована на аналоговом принципе, что обусловило ее невысокую точность. По этой причине она не получила широкого распространения в станках.

О принципе обучения вспомнили, когда возникла необходимость програм-

мирования промышленных роботов (ИР), где, однако, используется цифровой способ записи сигналов.

Первые в СССР цифровые системы программного управления (ПУ) были разработаны Л.А. Глейзером (Московский станкоинструментальный институт). Программа записывалась десятичным кодом на перфоленте, количество дорожек перфоленты соответствовало числу видов подач. Перемещение перфоленты и считывание информации осуществлялись в стартстопном режиме. Управление приводами подачи производилось с помощью электромагнитных муфт. Общими недостатками разработок систем ПУ этого времени являются обилие механических устройств переработки и передачи информации, сложность кинематических связей, невысокая точность механизмов.

Развитию и совершенствованию систем ПУ способствовало широкое распространение индивидуального электропривода (ЭП) рабочих органов металлорежущих станков. Использование ЭП существенно упростило кинематические связи, позволило осуществить более гибкое индивидуальное управление, существенно улучшило динамические характеристики машин. В 40-е гг. интенсивно разрабатывались ЭП постоянного тока с электромашинным управлением. Свои первые шаги делал ЭП с вентильными преобразователями (на газоразрядных и ртутных приборах) постоянного и переменного тока. Изобретение тиристоров в 1957 г. явилось логическим результатом поиска новых средств, способных коренным образом улучшить качественные и технико-экономические показатели ЭП.

Необходимость и потребность в большом количестве вычислений в управляющих и информационных системах привели к созданию в 1943 г. первой цифровой ЭВМ (США). Опыт эксплуатации первой ЭВМ, построенной на электронных лампах, выявил ее недостатки — большие габариты, вес, потребляемую мощность и низкую надежность. В 1947 г. был разработан первый в мире точечный германиевый триод — полупроводниковый усилитель, в котором усиление обеспечивалось изменением переходного сопротивления, что и дало название новому прибору — транзистор. Позднее, в 1949 г., авторы разработки У. Шокли, Дж. Бардин и У. Браттейн создали плоскостной транзистор, за что были удостоены в 1956 г. Нобелевской премии. С этого времени началось развитие полупроводниковой электроники, которая оказала решающее влияние на цифровую технику.

Дальнейший прогресс компьютеров связан с полупроводниками. В этом процессе важное значение имело изобретение в 1971 г. микропроцессорной большой интегральной схемы (БИС), на основе которой была построена первая четырехбитовая микроЭВМ Intel4004. В этом же году были созданы 8-битовый микропроцессорный набор и на его основе микроЭВМ Intel8008. В 1977 г. начался выпуск отечественных микроЭВМ серии "Электроника". Широкому распространению ЭВМ, в том числе в системах ЧПУ, способствовало снижение стоимости электронных компонентов (с 1955 г. примерно в 240 раз).

Первая отечественная цифровая система ПУ была разработана в 1958 г. Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков (ЭНИМС). Для нее характерны кодированная запись информации на перфоленту (двоичный код) и применение шаговых двигателей с гидроусилителем момента. Отсутствие датчиков обратной связи (ДОС) по положению обусловило простоту системы. Дискретный принцип работы шагового двига-

теля (ШД) позволял задавать перемещение рабочих органов программным путем. В дальнейшем такие системы получили широкое распространение, чему способствовало изготовление силовых ШД, способных приводить в движение РО без гидроусилителей. Вместе с тем выявилось, что отсутствие обратной связи по положению не позволяло гарантировать отработку заданных перемещений из-за сбоев в системе и пропусков в отработке в результате неправильного задания. Поэтому системы с ШД нашли ограниченное применение, особенно там, где на первый план встают вопросы простоты реализации.

Высокая помехоустойчивость и точность были достигнуты в фазовой системе ЧПУ, созданной в 1956 г. в Институте автоматики и телемеханики (ИАТ) (ныне — Институт проблем управления АН СССР) под руководством А.А.Булгакова. В качестве датчиков обратной связи использовались вращающиеся трансформаторы. Программоносителем являлась МЛ, на которой записывался синусоидальный сигнал, модулированный по фазе. С этого времени начинается все расширяющийся выпуск станков с ЧПУ.

В развитии системы ПУ и ЭВМ можно выделить аналогичные этапы. Отметим признаки, наиболее полно характеризующие уровень системы ПУ: 1) элементная база; 2) привод подачи; 3) способ подготовки управляющих программ; 4) конструкция станка; 5) использование ЭВМ.

Системы ПУ первого поколения строились на электромагнитных реле и дискретных компонентах, т.е. системы управления выполнялись из отдельных транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и т.д. Позднее из названных компонентов строились такие функционально законченные элементы, как триггеры и одновибраторы, служащие для построения более сложных систем. Системы ПУ оформлялись в виде отдельных пультов. В это же время изготавливались позиционные и контурные системы ПУ. Для станков сверлильной группы были разработаны системы ППС-2, "Координата С-68", "Координата С-70", "Координата С-70 (3)".

Для автоматизации карусельных, координатно-расточных и ряда других станков, где требуется позиционирование и прямоугольное формообразование, были разработаны пульты серии П "Координата Р-69", ПЗ23, ПЗ23А, работающие по принципу совпадения и содержащие арифметические устройства и абсолютные ДОС.

Пульты серии СЦ (СЦ-5, СЦ-7, СЦ-8) оснащены позиционными счетно-импульсными системами. Программоноситель — пятидорожечная перфолента, для СЦ-8 применен код БЦК-5, для СЦ-7 — код 5211. В ряде систем первого поколения (ПРС-3К, "Контур 4МИ") использовалась в качестве программносителя МЛ и имелся шаговый привод подачи. Системы ПРС-3К и "Контур 4МИ" предназначались для контурной обработки на токарных и фрезерных станках. Они различались способом записи программы на МЛ.

В системе ПРС-3К для управления шаговым двигателем ШД-4 по каждой из координат используются три дорожки МЛ, на которых записываются пакеты высокочастотных синусоидальных сигналов, определяющих порядок переключения токов в обмотках ШД. При такой схеме отсутствует обычный коммутатор фаз ШД; в каждом из девяти каналов (по числу дорожек) имеются усилители, обеспечивающие необходимую силу тока в обмотках.

В системе ЧПУ "Контур 4МИ" для управления ШД подачи по каждой из координат используются две дорожки МЛ: одна для движения вперед, вто-

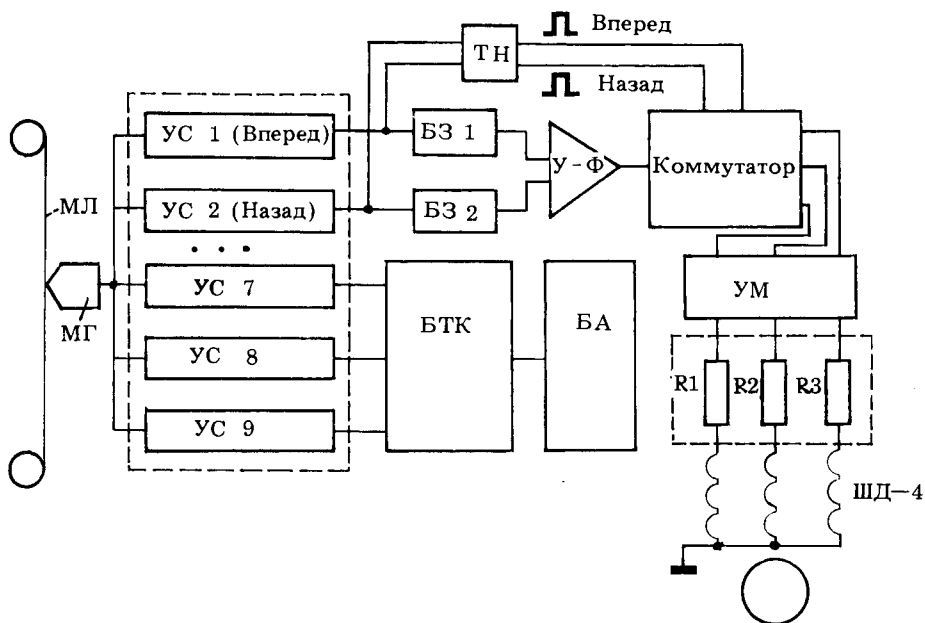


Рис. 1.3. Функциональная схема системы ЧПУ "Контур 4МИ".

рая — для движения назад. Изменился также характер записанной информации — последовательность импульсов теперь определяет частоту коммутации обмоток ШД и программируемое переключение. Распределение импульсов по фазам ШД осуществляется коммутатором (рис. 1.3) в соответствии с требуемым алгоритмом. Коммутатор фаз выполнен реверсивным. Установка коммутатора для счета в нужном направлении (Вперед или Назад) осуществляется тем же информационным импульсом, который несет информацию о перемещении. Для этого между усилителем считывания (УС) и коммутатором установлены блоки задержки (БЗ). Импульс, поступающий из УС, попадает на БЗ и одновременно на триггер направления счета (ТН), который устанавливает коммутатор для счета в нужном направлении. На счетный вход коммутатора импульс поступит лишь спустя некоторое время, пройдя также усилитель-формирователь (У-Ф). Последующий импульс лишь подтвердит установленное направление счета.

Таким образом, шесть УС используются для управления по координатам X, Y, Z ; еще три усилителя УС7, УС8 и УС9 применяются для управления блоком технологических команд (БТК), который в свою очередь связан с блоком автоматики (БА). Сигналы технологических команд в виде пакетов импульсов частотой до 1 кГц записываются на МЛ, затем преобразуются в постоянное напряжение и управляют состоянием реле технологических команд. БА управляет работой лентопротяжного механизма. Для считывания информации с МЛ применяется девятидорожечная магнитная головка (МГ) типа ГМВ-35/9.

Рассмотренная система предназначена для станков типа 6Н13ФЗ.

Системы ПУ первого поколения имели постоянную структуру, что не давало возможности вносить коррекцию по ходу обработки детали. Программирование выполнялось вручную. Системы применялись для существующих станков, конструкция которых оставалась неизменной. Кроме привода с ШД, часто использовали ступенчатый привод подачи (системы "Координата С-68", С-70, Р-69, П323 и др.). Несмотря на ограниченные технологические возможности, трудоемкость подготовки программ на МЛ, системы ПУ первого поколения отличались эффективностью в эксплуатации вследствие простоты устройства и повышения производительности за счет снижения машинного и вспомогательного времени.

Системы ПУ второго поколения характеризуются применением интегральных схем (ИС) малой степени интеграции. В это время создаются системы Н331М, Н332М, Н221М, П321М для наиболее распространенных токарных, фрезерных и сверлильных станков. Расширение технологических возможностей станков привело к необходимости применения восьмидорожечной ленты и кода ISO = 7 bit, станки оснащаются устройствами автоматической смены инструмента. Совершенствуется ЭП подач: внедряется следящий привод постоянного тока, повышается частота питания шаговых ЭП (до 8 кГц); увеличивается номенклатура ДОС по положению рабочих органов.

Предшествующие системы обеспечивали согласованное движение РО станка с помощью предварительно декодированной (расшифрованной) информации, записанной на МЛ. Декодирование выполнялось централизованным интерполятором. Поэтому коррекция такой программы непосредственно у станка является невозможной. Системы второго поколения оснащаются встроенными интерполяторами, что делает их автономными. Теперь оператор с пульта управления может воздействовать на некоторые участки программы для их коррекции, вызванной технологическими особенностями обработки. Совершенствование систем ЧПУ данного поколения касается схемно-конструкторских реализаций при расширении номенклатуры ИС малой и средней степени интеграции.

Большое значение имели разработка методов автоматической подготовки управляющих программ и развитие математического обеспечения, что оказало решающее влияние на дальнейший прогресс систем ЧПУ (трудоемкость программы объемом 402 кадра оценивается затратами 40 ч времени при ручном программировании). Создаются специальные языки и системы программирования, станки оснащаются устройствами цифровой индикации. Системы указанных типов относятся к классу систем с жесткой логикой, обеспечивающих выполнение заданного алгоритма управления за счет схемных решений (существует также название "аппаратная реализация алгоритма управления").

В этот период тормозом в повышении эффективности автоматизации являются большие потери времени, связанные с транспортировкой деталей со станка на станок. Доля машинного времени составляет лишь 20 % от времени полного цикла обработки на станке, если для полной обработки детали требуется около пяти установок. Этот недостаток устраняется в многооперационных станках, в которых вся обработка изделия осуществляется с одной установкой. Такие станки относятся к станкам типа "обрабатывающий центр". Это автоматизированные станки с ЧПУ, обеспечивающие выполнение большой

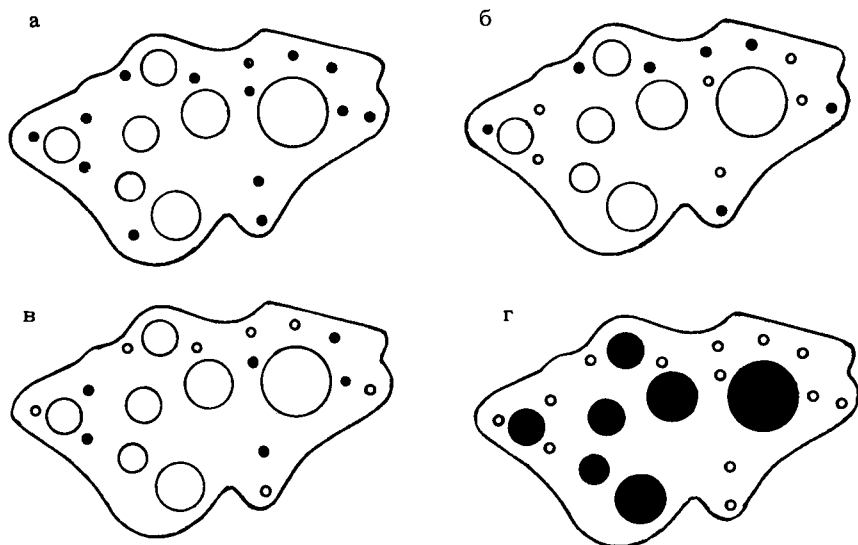


Рис. 1.4. Эскиз детали, обрабатываемой на многооперационном станке.

номенклатуры технологических операций без перестановки детали и с автоматической сменой инструмента. Многооперационные станки не являются простым усовершенствованием обычных станков с целью повышения производительности. В них нашел отражение новый подход к организации технологического процесса обработки, который в дальнейшем явился основой развития гибкого автоматизированного производства.

Многооперационные станки разделяются на станки для обработки деталей типа тел вращения, корпусных и плоских изделий.

Число типов таких станков, несмотря на многообразие деталей, ограничено. Можно выделить три основные группы деталей: тела вращения (47 %); корпусные детали (26 %); плоские детали (27 %). Среднестатистические данные по видам операций распределяются следующим образом: фрезерование требуется для 20 % деталей, растачивание — для 10, сверление и нарезание резьбы — для 70 %.

В отличие от обычных станков-автоматов, где высокая производительность достигается совмещением технологических переходов и многоинструментальной обработкой, многооперационные станки обеспечивают резкое сокращение затрат вспомогательного и подготовительно-заключительного времени и интенсификацию режимов резания. В условиях серийного и мелкосерийного производства доля машинного времени на прецизионных станках не превышает 18–20 %, на станках с ЧПУ она увеличивается до 50–60, а на многооперационных станках достигает 80–90 %.

Обеспечение быстрой смены инструмента делает экономически оправданной интенсификацию режимов резания. Резко сокращается объем контрольных операций, поскольку заготовка остается в одних и тех же центрах. В результате этих факторов производительность многооперационных станков по-

вышается в 4–10 раз по сравнению с производительностью универсальных станков. На рис. 1.4 показан вид детали, обрабатываемой на многооперационном станке, выполняющем сверление (а), зенкерование (б), нарезание резьбы (в) и растачивание (г) с одной установки (обрабатываемые отверстия на каждой операции зачернены).

Для систем ПУ третьего поколения характерно использование ЭВМ, что связано с их проникновением в сферу материального производства. На этой основе изменяется структура системы ПУ. Характерным для данного этапа развития системы является размещение блока памяти (БП) между считывающим устройством программы и системой управления. БП выполняется с возможностью наращивания и может использовать магнитные диски и барабаны. В такой системе считывающее устройство – устройство фотоввода (УФВ) – используется только для ввода программы в промежуточную память. Считанную программу можно проверить и убедиться в ее правильности. Это существенно повышает надежность систем ПУ, так как до 70 % неисправностей возникает из-за УФВ. Появилось даже специальное международное обозначение таких систем с ЭВМ – SNC (Speicher Numerical Control). Это разновидность систем, в которых предусмотрено хранение всей управляющей программы.

Типичным представителем системы ЧПУ указанного класса является система Н55. Она предназначена для управления универсальными и специализированными многокоординатными станками, выполняющими обработку сложных плоскостных и объемных деталей. В системе Н55 использована структура специализированной ЭВМ с микропрограммным управлением. Функциональная схема системы (рис. 1.5) состоит из двух основных частей: вычислителя и устройства связи с объектом (УСО), т.е. со станком. Система может работать в автономном режиме от УФВ, что является характерным для системы ПУ предшествующего поколения, и при групповом управлении от ЭВМ, что позволяет относить ее к рассматриваемому поколению.

Программоносителем является восьмидорожечная перфолента, на которой записывается информация в коде ISO. Функции вычислителя: хранение микрокоманд (МК) в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) емкостью 2048 76-разрядных слов; хранение МК в оперативном ЗУ (ОЗУ) емкостью 128 26-разрядных слов; обработка информации, представленной в двоично-десятичном коде, в арифметико-логическом устройстве (АЛУ); ввод данных с перфоленты в оперативную память; ввод данных из ЭВМ, при этом пропускная способность канала связи составляет 5000 байтов в секунду, а объем программы – до 1000 кадров; передача информации из буферной части оперативной памяти в рабочую; линейная интерполяция; круговая интерполяция; линейно-круговая интерполяция; разгон до заданной скорости и замедление; поддержание постоянной контурной скорости; расчет проекций смещения радиуса инструмента (эквидистанты); установка исполнительных органов в исходное состояние; ввод числовой информации с 35 наборных переключателей, расположенных на пульте коррекции (ПК); ввод с пульта оператора (ПО) следующей информации: режимов работы (до 9), коррекции подачи (до 11 значений).

Скорости считывания информации электромеханическим фотосчитывающим устройством (УФВ) и обработки не совпадают. Поэтому сначала информация через устройство ввода-вывода (УВВ) поступает в буферную часть пере-

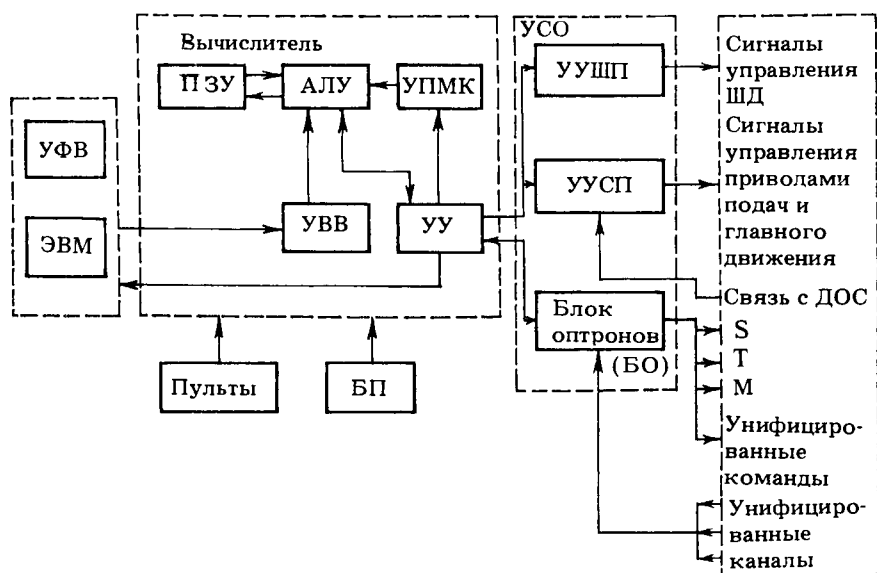


Рис. 1.5. Структурная схема системы ЧПУ Н-55.

программируемого ЗУ (ППЗУ), а затем по соответствующему алгоритму определяется смещение радиуса инструмента, что необходимо для дальнейшего расчета эквидистантного контура.

Одновременно с алгоритмом ввода или алгоритмом расчета смещения производится обработка предыдущего кадра по алгоритмам линейной или круговой интерполяции. Все расчеты производятся в АЛУ в соответствии с микрокомандами, хранящимися в устройстве памяти микрокоманд (УПМК). Алгоритмы работы системы выбираются из УПМК в необходимой последовательности по командам устройства управления (УУ), которое включает следующие узлы: блок приема и дешифрации микрокоманд из УПМК; генератор тактов; формирователь регистра адреса МК; пульт оператора; пульт коррекции; пульт настройки.

Организация порядка выполнения алгоритма осуществляется программой-диспетчером. Основной ее функцией является обеспечение работы устройства в режиме разделения времени, позволяющем совмещать обработку данного кадра с вводом и расчетом смещения следующего кадра. Появление какой-либо заявки не всегда сопровождается ее выполнением из-за недостатка времени для реализации ее алгоритма. Команды в УПМК выбираются в последовательности, определяемой регистром адреса микрокоманд (РАМ). Вся микрокоманда выполняется за 1–2 мкс.

Данная система позволяет заказывать набор алгоритмов в зависимости от требований потребителя.

Устройство связи с объектом осуществляет связь со станком и обеспечивает потенциальную развязку цепей системы и схемы управления станка. Имеются две модификации выходных устройств: устройство управле-

ния шаговым приводом (УУШП) и устройство управления следящим приводом (УУСП). Через блок оптрона (БО), который предназначен для потенциальной развязки цепей, по унифицированному каналу связи на станок поступают технологические команды S, T, M; на БО поступают сигналы о состоянии РО станка и технологические данные о процессе резания. УУШП обеспечивает 12-тактовую коммутацию обмоток ШД в последовательности 1-2, 1-2-3, 2-3, 2-3-4, ..., 6-1-2, 1-2 с частотой 8 кГц. Тип двигателя — ШД5 Д1.

УУСП обеспечивает работу с ДПС ДЛМ-11 и ВТМ-1В в режиме контурной обработки и специальных режимах позиционирования. Дискретность перемещения составляет 0,01 мм. Программносителем является восьмидорожечная перфолента шириной 25,4 мм; скорость ввода программы с перфоленты — не менее 300 строк/с. Число управляемых координат от 2 до 5. Формирование разгона и торможения осуществляется по линейному закону. Для линейной и круговой интерполяции применяется цифровой дифференциальный анализатор. В системе Н55 предусматривается возможность диалога с оператором. С пульта оператора осуществляется в случае необходимости ручное изменение скорости подачи в пределах 10–110 % от заданной в программе; возможно смещение нуля по пяти координатам и ввод коррекций (до 30). На пульте оператора имеется индикация: номера кадра — три десятичных разряда; номера инструмента — два десятичных разряда; геометрической информации — 6 десятичных разрядов.

Приведем режимы работы устройства:

- 1) "Исходный" — устройство выводит рабочие органы станка в "0";
- 2) "Наладка" — рабочие органы станка перемещаются по выбранной координате с заданной скоростью;
- 3) "Преднабор" — ввод информации с пульта оператора вручную, ввод коррекции и смещение нуля с пульта коррекции;
- 4) "Кадр" — покадровая отработка программы. По команде "поиск кадра" система находит кадр, номер которого совпадает с номером, набранным на пульте оператора.

Полуавтоматический режим реализуется нажатием кнопки "Останов по концу кадра", при этом производится покадровая отработка выбранного режима.

Рассмотренные системы ЧПУ относятся к классу автономных. Раньше такие системы составляли основной парк оборудования и обладали рядом преимуществ по сравнению с обычными станками. Вместе с тем обнаружились и их недостатки: частые сбои в работе (в основном из-за системы фотоввода); трудоемкость программирования; слабая загрузка интерполятора, что в целом определяет большую стоимость систем. Больше всего сложностей возникло с программированием, так как требовалась отдельная ЭВМ (возможно, вне предприятия). Между тем еще в 1968 г. в США для управления станками с ЧПУ использовалась большая ЭВМ, основной нагрузкой которой была обработка информации в системе АСУ предприятия. Таким образом, наличие достаточно мощной ЭВМ позволяет управлять группой станков с ЧПУ, которые не имеют автономного интерполятора. Исключается также фотоввод для каждой системы ЧПУ. Такие системы получили название "прямого цифрового управления" (DNC). Они имеют следующие достоинства: широкое применение

ние унифицированных узлов и устройств, что предопределяет упрощение обслуживания; повышение надежности за счет исключения фотоввода; возможность автоматизации загрузки оборудования с целью обеспечения оптимальной очередности изготовления изделий; обеспечение контроля за состоянием группы станков; возможность подсоединения к ЭВМ верхнего уровня.

Четвертое поколение систем ПУ характеризуется широким использованием микроЭВМ, микропроцессоров и БИС различного назначения, что связано в первую очередь с прогрессом в области вычислительной техники. МикроЭВМ или микропроцессорный набор включается непосредственно в контур управления, что позволяет выделить класс систем CNC на базе микроЭВМ (ЧПУ-ЭВМ). Гибкость системы обеспечивается возможностью изменять набор стандартных устройств с целью обеспечения выполнения требуемых функций.

Основу отечественных систем ЧПУ-ЭВМ составляют микроЭВМ "Электроника 60", "Электроника НЦ-03", "Электроника НЦ-31". В состав периферийных устройств входят: фотосчитывающее устройство (ФСУ) с перфоленты, дисплей на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) или на газоплазменной панели, пульты операторов с алфавитно-цифровой клавиатурой. Дополнительно возможно подключение внешнего печатающего устройства. Системы ЧПУ-ЭВМ называют системами с переменной структурой, подчеркивая их отличие от систем с жесткой логикой. Функционально системы ЧПУ-ЭВМ подобны обычным автономным системам ЧПУ. Однако наличие ЭВМ в контуре управления обеспечивает автоматизацию программирования, диагностику неисправностей, адаптивное управление. Программирование облегчается применением языков высокого уровня и вводом программы непосредственно с пульта управления в так называемом диалоговом режиме. Ведутся интенсивные исследования по совершенствованию индивидуальных систем ЧПУ с речевым способом подачи команд. Голосовые команды анализируются и преобразуются в необходимый формат программы для ЭВМ. Естественно, словарный запас таких систем ограничен и составляет 40–60 слов.

ЧПУ-ЭВМ могут работать в диалоговом режиме, в котором значительно упрощается ввод данных при минимальной квалификации оператора. Встроенная ЭВМ позволяет легко воспринимать информацию от внешних ЗУ или от другой ЭВМ более высокого уровня. Здесь выявляется еще одно преимущество таких систем — возможность их объединения для создания гибких производственных модулей.

Системы ЧПУ-ЭВМ позволяют производить автоматическую диагностику, что существенно сокращает простои оборудования. В процессе диагностики, например, указывается код элемента (микросхемы на плате управления), который является причиной неисправности.

В рассматриваемый период интенсивно развивается и другой класс систем ПУ — цикловые системы, на которые оказала влияние электроника. Релейно-контактные системы управления цикловых систем заменяются более совершенными устройствами бесконтактной автоматики — программируемыми контроллерами (ПК), которые строятся по принципу специализированных ЭВМ. Применение ПК оказывается целесообразным, если он может заменить 50–70 реле. Использование ПК особенно эффективно при управлении агрегатными станками, автоматическими линиями и другим оборудованием с

ярко выраженным цикловым характером работы. Производством ПК занимаются зарубежные фирмы TESLA (ЧССР), VEM (ГДР), ALLEN-BRADLEY, MODICON (США), SIEMENS (ФРГ), FESTO (Австрия), TOYODA (Япония). Разработаны также отечественные модели ПК: ПК1024, КП-1, "Гранит-02" и др.

Оснащение станков типа "обрабатывающий центр" индивидуальными ЭВМ показало, что для дальнейшего совершенствования производства необходима автоматизация погрузочно-разгрузочных и транспортных операций как между отдельными единицами оборудования, так и в системе "склад-цех". В этом процессе появляются промышленные роботы, которые можно рассматривать как результат совершенствования систем ПУ (в том числе в отдельных случаях — цикловых) и как необходимый элемент гибкого автоматизированного производства (ГАП). Поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть развитие робототехники как одной из составляющих ГАП.

Термин "робот" впервые ввел известный чешский писатель Карел Чапек в 1920 г. в своей фантастической пьесе "R. U. R" (Россумские универсальные роботы), где так были названы механические рабочие, предназначенные для замены людей на тяжелых физических работах. Само слово "робот" произошло от чешского слова *robota*, означающего тяжелый, подневольный труд. Возможно, писатель и не подозревал, какие последствия будет иметь его творческая фантазия: ведь ныне роботы находят применение именно в тяжелых, монотонных и вредных для здоровья людей производствах. У Чапека роботы представлены злобными созданиями, стремящимися завоевать мир. Позднее, в начале 40-х гг., слово *robotics* употребил писатель-фантаст А. Азимов, у которого роботы всегда доброжелательны и подчиняются воле человека.

Попытки создания механического "человека" делались давно. Еще в средние века конструировались различные автоматы, принцип действия которых основывался на весьма точных механизмах. Часы с движущимися фигурками до настоящего времени демонстрируются многочисленным туристам на Староместской площади в Праге. Человекоподобные механические фигуры были названы андроидами. Особого совершенства достигли андроиды в эпоху расцвета часового мастерства. И это неудивительно, поскольку в их основе лежали те же механизмы, которые использовались в часах, обеспечивая не только перемещение стрелок для точного отсчета времени, но и проигрывание мелодий в зависимости от времени суток, смену фигурок и т.д.

Традиционный вид подвижного робота, в общем похожего на человека, закрепился в художественной литературе еще со времен Гомера. Такие роботы называются антропоморфными. Современный писатель-фантаст А. Азимов также описывает роботов, которые внешне похожи на человека. Это объясняется, видимо, тем, что человеку приятнее и привычнее отдавать распоряжения подобному себе (к тому же никогда не получая отрицательного ответа). В настоящее время промышленные роботы мало напоминают человека по внешнему виду.

Фактически история современной робототехники началась с создания универсальных манипуляторов в связи с потребностями общественного производства, в частности атомной промышленности. Поскольку непосредственный контакт человека с радиоактивными веществами опасен, появились ма-

нипуляторы с ручным, а позднее — с автоматизированным управлением. Первые манипуляторы были пассивными, т.е. повторяли движения руки человека только за счет его мускульной силы. Задающий и копирующий органы манипулятора разделялись защитным экраном.

Для промышленного применения строятся манипуляторы большой грузоподъемности с приспособлениями типа вакуумного, схвата и проникающего (стержневого). Вакуумное приспособление удобно применять для манипулирования объектами типа листового стекла, пластин металла, дерева, т.е. объектов с плоской поверхностью, например холодильников. В большинстве манипуляторов копирующего типа предусматривается человек-оператор в контуре управления (рис. 1.6). При частой повторяе-

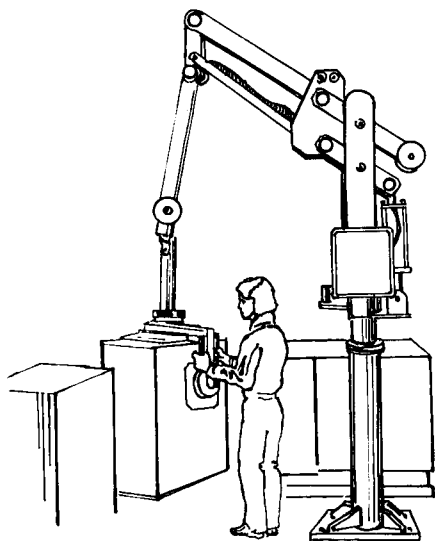


Рис. 1.6. Манипулятор копирующего типа с оператором.

мости операций (например, перегрузка листового металла) управление передавалось компьютеру. При этом назначение человека-оператора — выполнение более сложных операций и функций обучения.

На смену манипуляторам с ручным управлением пришли устройства с автоматическим управлением — промышленные роботы (ПР). Первые манипуляторы подобного типа были созданы в США в 1960–1961 гг. и имели захваты, снабженные различными датчиками — контактными, давления и фотоэлектрическими. Такой манипулятор получил название руки Эрнста по имени его создателя (Г. Эрнста). Патент на применение программируемого манипулятора был получен в США в 1956 г.

Первые промышленные роботы в современном понимании были выпущены в 1962 г. фирмой АМФ (AMF). Это были роботы типа "Версотран". Примерно в это же время появились ПР "Юнимейт-1900", которые нашли применение на заводах фирм "Дженерал Электрик", "Форд", "Дженерал Моторс". Спустя некоторое время в производство ПР включились все развитые капиталистические страны Запада и Япония. В 1967 г. начинается выпуск роботов в Англии по лицензии США. В 1968 г. японская фирма "Кавасаки Дзюкоте" закупила технологию фирмы "Юнимэйшн" и с 1970 г. приступила к производству роботов. В 1971 г. начали выпускать ПР в ФРГ, в 1972 г. — во Франции, в 1973 г. — в Италии. Ведущее место в капиталистическом мире по производству и применению промышленных роботов занимает Япония. Так, за 1974–1982 гг. среднегодовой прирост выпуска роботов в Японии составлял 40%.

Широкое внедрение ПР в производство началось только в 80-е годы. К этому времени в промышленности окончательно завершился переход к многономенклатурному производству изделий малыми партиями на основе ГАП.

Выявилась также нехватка рабочей силы, особенно квалифицированной. Кроме того, в предшествующие годы произошло стремительное развитие самой технологии роботостроения на основе усовершенствования микропроцессорных систем управления, а также общего развития мехатроники (механики + электроники).

В настоящее время производством роботов занято около 200 зарубежных фирм, которые выпускают более 250 моделей роботов, применяемых в промышленности. При количественной оценке числа роботов в Японии возникают затруднения, связанные с различным толкованием понятия "робот". Японская ассоциация промышленных роботов относит к классу роботов следующие машины: 1) ручные манипуляторы, управляемые оператором; 2) автоматические манипуляторы, работающие по жесткой программе, задаваемой, например, с помощью механических связей; 3) роботы с обучением (обучение производит оператор, а затем последовательность действий осуществляется автоматически); 4) роботы с ЧПУ (программа движений составляется заранее в буквенно-цифровом коде и затем вводится с помощью программистов); 5) адаптивные роботы, способные воспринимать и перерабатывать информацию о состоянии внешней среды и снабженные с этой целью различными сенсорными датчиками. Эти роботы называются также интеллектуальными.

Соотношение (%) различных видов роботов в Японии по данным 1980 г. приведено в табл. 1.1, из которой следует, что подавляющее большинство составляют манипуляторы с жестким цикловым управлением. Этим и объясняется большое количество роботов в Японии (по данным многочисленных публикаций).

В Европе и в США к числу роботов относят программируемый манипулятор, предназначенный для перемещения материалов, деталей и инструментов посредством программно-изменяемых движений с целью выполнения разнообразных операций. Очевидно, что под это определение подпадают роботы, на-

Таблица 1.1

Наименование	Количество, %
Манипуляторы с ручным управлением	12,0
Автоматические манипуляторы с жестким цикловым управлением. Изменение рабочего цикла весьма сложно	69,5
Промышленные роботы, работающие по предварительно заданной программе. Изменение программы не представляет трудностей	9,5
Промышленные роботы, рабочий цикл которых задается в процессе обучения оператором. Последовательность операций, точки позиционирования запоминаются и затем воспроизводятся автоматически	5,6
Промышленные роботы с ЧПУ. Управляющая программа содержит всю необходимую информацию о последовательности операций, точках позиционирования и т.д.	1,4
Роботы с элементами адаптивного управления, снабженные датчиками очувствления и системой управления с элементами искусственного интеллекта	2,0

званные в пп. 3, 4 и 5. В ряде развитых капиталистических государств (Япония, Франция, ФРГ, Англия и т.д.) созданы национальные ассоциации по робототехнике и программы, финансируемые государством. Например, в Японии в 1980 г. была создана фирма JAROL, которая сдает роботы в аренду, облегчая тем самым процесс их внедрения в промышленность. Только за первый год своего существования фирма сдала в аренду около 150 роботов.

В последние годы замечена тенденция к росту производства более сложных роботов: средняя стоимость робота за 1978–1982 гг. возросла примерно в 2,5 раза.

Области применения ПР самые разнообразные. Их используют при обработке металлов давлением, точечной и дуговой сварке, обслуживании станков, упаковке продукции и т.д. В ближайшем будущем возрастет применение ПР в таких операциях, как сборка, испытание и контроль, литье под давлением.

По данным Общего рынка, в капиталистических странах в настоящее время насчитывается 31 тыс. промышленных роботов. Первое место занимает Япония — 13 тыс., далее следуют США — 6,250 тыс., затем ФРГ — 3,500 тыс., Швеция — 1,300 тыс., Англия — 1,152 тыс. По отношению числа роботов к общему числу промышленных рабочих первое место занимает Швеция, имеющая 30 роботов на 10 тыс. рабочих, в Японии их всего 13.

В Советском Союзе в 1968 г. впервые был создан телеуправляемый от ЭВМ подводный робот "Манта", имеющий захватное устройство с осязанием. Это была совместная разработка Института океанологии АН СССР и Ленинградского политехнического института.

Несколько ранее, в 1966 г., Экспериментальным научно-исследовательским институтом кузнечно-прессовых машин (ЭНИКМАШ) был разработан (изготовлен Воронежским заводом кузнечно-прессового оборудования) автоматический манипулятор с цикловым управлением для загрузки и выгрузки штучных заготовок листоштамповочного производства. Был выпущен также робот ПРЦ-1 (разработка ЭНИКМАШ) со сменным комплектом захватов (в зависимости от вида переносимой заготовки). "Руки" его выполнялись в виде пневматических цилиндров. Система управления была пневматическая или электрическая. В последнем случае программа перемещения задавалась установкой контактов на коммутационной панели.

На выставке в Москве "АСУ-74" демонстрировался промышленный робот УМ-1. На его основе разработаны также универсальные манипуляторы УМ1П и УМ1Т. Программирование осуществлялось на перфоленте в коде БЦК-5; максимальная грузоподъемность робота составляла 10 кг. Популярными в то время моделями роботов были также "Универсал-50", УПК-1 и др.

Первый экспериментальный образец интеллектуального (интегрального) робота был создан в 1971 г. в ЛПИ. Робот имел техническое зрение и речевое управление. За годы девятой пятилетки было создано свыше 30 моделей промышленных роботов различного применения, а за годы десятой пятилетки — более 100 моделей роботов. Развертывается серийное производство ПР, и к 1980 г. их общее количество в стране составило более 6 тыс. штук.

Отечественная робототехника вступила в новый этап своего развития в 1980 г., когда было принято Постановление ЦК КПСС "О мерах по увеличению производства и широкому применению автоматических манипуляторов в

отраслях народного хозяйства в свете указаний XXV съезда КПСС”.

Дальнейшая конкретизация путей развития робототехники произведена в Постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР ”О мерах по ускорению научно-технического прогресса в народном хозяйстве”, в котором в качестве одного из главных направлений работы определена широкая автоматизация технологических процессов на основе применения автоматизированных станков, унифицированных модулей оборудования, робототехнических комплексов и вычислительной техники. В одиннадцатой пятилетке планировалось разработать более 100 моделей автоматических манипуляторов и автоматизированных технологических комплексов типа ”оборудование — манипулятор”, построенных на модульном принципе с применением микропроцессорной техники. Созданы отраслевые и региональные программы. Роботостроение выделено в самостоятельное направление в Министерстве приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР. С 1982 г. в этом министерстве действовала отраслевая программа по созданию и внедрению комплексов роботов-манипуляторов и гибких автоматизированных производств на 1982—1986 гг. По этой программе было предусмотрено разработать и внедрить на предприятиях приборостроения 30 тыс. автоматических манипуляторов и робототехнических комплексов. Это позволило условно высвободить 45 тыс. человек. Наряду с роботами первого и второго поколений предусматривалось производство ”интеллектуальных” роботов, способных выполнять технологические операции с распознаванием образов. Большинство роботов производилось по модульному принципу, что позволяет собирать манипуляторы различного назначения из ограниченного набора модулей.

Могилевским заводом ”Техноприбор” выпущен робот ”ТУР-10” (технологический универсальный робот), признанный лучшей моделью 1982 г. Робот оснащен электрическим приводом на все координаты (за исключением схвата, привод которого выполнен пневматическим) и кодовыми датчиками положения. К промышленным роботам последнего поколения относятся универсальный робот РМ-01 (робот манипуляционный), отличающийся применением многоуровневой микропроцессорной системы управления, робот для точечной сварки ”Бета”, имеющий несколько модификаций, и ряд других моделей.

Таким образом, можно выделить следующие компоненты комплексной автоматизации: системы ЧПУ, построенные на базе микрокомпьютеров, металлорежущее оборудование типа ”обрабатывающий центр” и промышленные роботы. В комплексе эти составляющие позволяют осуществить концепцию ГАП, которое рассматривается как высшая степень системной автоматизации.

ГАП обеспечивается следующими факторами. Чтобы перейти к изготовлению любой запрограммированной детали из заданной номенклатуры, достаточно назвать ее шифр и ввести программу обработки, хранящуюся в ЭВМ. В соответствии с имеющимся математическим обеспечением ЭВМ наилучшим образом распределит загрузку модулей, направит деталь от станка к станку по наиболее выгодному пути, обеспечит распределение необходимых программ обработки по модулям ГАП. Такой подход к автоматизации производства позволяет сократить численность обслуживающего персонала, повысить качество продукции, улучшить использование оборудования и ритмичность производства. Наибольшее распространение ГАП получили в машиностроении. Од-

ним из примеров в этой области является автоматизированный цех Днепропетровского электровозостроительного завода (ДЭВЗ), созданный в результате совместных разработок ДЭВЗ, ЭНИМС, Оргстанкинпрома и Ленинградского института авиационного приборостроения и сданный в эксплуатацию в 1980 г.

Цех имеет 33 станка с ЧПУ, один универсальный станок, транспортно-накопительную систему типа ОРГ-4 в составе двух автоматизированных складов модели СТАС-3 и транспортного робота, инструментальный участок. Станки в цехе расположены по два—четыре в модуле. Важно обратить внимание на некоторые показатели этого цеха. Годовой выпуск продукции увеличился на 20 %, производственные площади уменьшились на 630 м², производительность труда возросла в 3,3 раза. В результате улучшения использования оборудования парк станков сократился на 53 единицы, высвобождены 83 человека. Цех выпускает около 400 наименований деталей, при числе их в партии от одной до ста. Первый опыт эксплуатации ГАП показал его высокую технико-экономическую эффективность, несмотря на значительные капитальные вложения. Вместе с тем была выявлена необходимость объединения процесса изготовления с системой автоматизации проектирования (САПР) и связанной с ней автоматизированной системой научных исследований (АСНИ). По сути дела, САПР должна рассматриваться как подсистема ГАП, органически ему принадлежащая. Одновременно САПР является эффективным средством повышения надежности, оптимизации конструкций и технологичности изделий, повышения в десятки раз производительности инженерного труда.

Создание роботизированного цеха на Петродворцовском часовом заводе (г. Ленинград) позволило высвободить свыше 1000 сборщиц. Действующие на Минском часовом заводе 1237 манипуляторов высвободили более 600 человек. Полученный опыт позволяет ставить задачу по созданию автоматизированных предприятий. Такими объектами станут два московских часовых завода, где будут функционировать многоуровневые системы управления производством. Имеются многочисленные примеры создания роботизированных технологических комплексов (РТК) и ГАП за рубежом.

Прогнозируется, что в Японии к 1990 г. будет работать от 1 до 3 млн роботов, каждый из которых заменит 4—5 рабочих. Автоматизация сборки с помощью роботов на заводе радиотехнической фирмы "Тосиба" позволила высвободить 60 % сборщиц и повысить производительность труда на 50 %. Благодаря роботизации производства в Японии выпускается около 60 автомобилей в год на каждого рабочего, в то время как в США — лишь 20.

В нашей стране вопросам автоматизации придается одно из первостепенных значений. В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 гг. и на период до 2000 г., принятых XXVII съездом КПСС, поставлена задача создания производственного потенциала, равного по своим масштабам накопленному за все годы Советской власти. Путь для достижения этой цели — всемерная интенсификация и повышение эффективности производства на базе научно-технического прогресса. Планируется последовательно повышать организационную и технологическую гибкость производства; внедрять автоматизированные системы в различные сферы хозяйственной деятельности, и в первую очередь в проектирование, управление оборудованием и технологическими процессами; поднять уровень автоматиза-

ции производства примерно в два раза, создавать комплексно-автоматизированные производства, которые можно быстро и экономично перестраивать.

Коэффициент сменности работы оборудования в 1990 г. будет доведен до 1,6–1,8, в том числе оборудования с программным управлением и автоматических линий до 1,9 и гибких производственных модулей и систем до 2–2,5. Планируется увеличить производство автоматизированных и роботизированных комплексов и линий, гибких производственных систем металлообработки, в том числе для листовой и объемной штамповки, ускоренно развивать выпуск систем числового программного управления для многофункциональных станков и гибких производственных модулей, программируемых командоаппаратов для различных видов оборудования.

1.2. СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИИ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Высшей формой комплексной автоматизации является ГАП, позволяющее быстро переходить на выпуск новой продукции, сохраняя при этом высокую производительность. ГАП представляет собой сложную структуру, содержащую следующие основные части: технологическое оборудование с программным управлением, обладающее необходимой степенью гибкости; автоматизированную складскую и транспортные системы, обеспечивающие подачу заготовок, обработанных деталей и смену инструмента; систему оперативного управления и планирования, основанную на применении ЭВМ; САПР, которая в самом общем случае может быть соединена с АСНИ.

По сложности ГАП структурно подразделяются на следующие уровни (согласно ГОСТ 26228–84): гибкий автоматизированный модуль (ГАМ); гибкая автоматизированная линия (ГАЛ); гибкий автоматизированный участок (ГАУ); гибкий автоматизированный цех (ГАЦ); гибкий автоматизированный завод (ГАЗ).

Под ГАМ понимают автономно функционирующую единицу технологического оборудования, оснащенную автоматизированным устройством программного управления и средствами автоматизации технологического процесса, осуществляющую многократные циклы и имеющую возможность встраивания в систему более высокого уровня. ГАМ оснащается устройством смены инструмента, заготовок, удаления отходов и в более общем случае — устройствами автоматического контроля и подналадки технологического процесса.

Несколько ГАМ, объединенных общей системой управления и транспортной системой (транспортёры, поворотные столы, транспортные роботы), составляют ГАЛ, если образуется один поток изделий, и ГАУ, если имеется несколько потоков изделий. Комплекс ГАМ, ГАЛ и ГАУ, объединенных общей информационно-управляющей и транспортно-складской системами, образует ГАЦ.

ГАЗ представляет собой совокупность ГАМ, ГАЛ, ГАУ и ГАЦ, охватывающих все виды технологических процессов (кузнечно-прессовых, металлорежущих, литейных, окрасочных), объединенных АСУ верхнего уровня, обеспечивающей плавную перенастраиваемость на изготовление новых видов изделий.

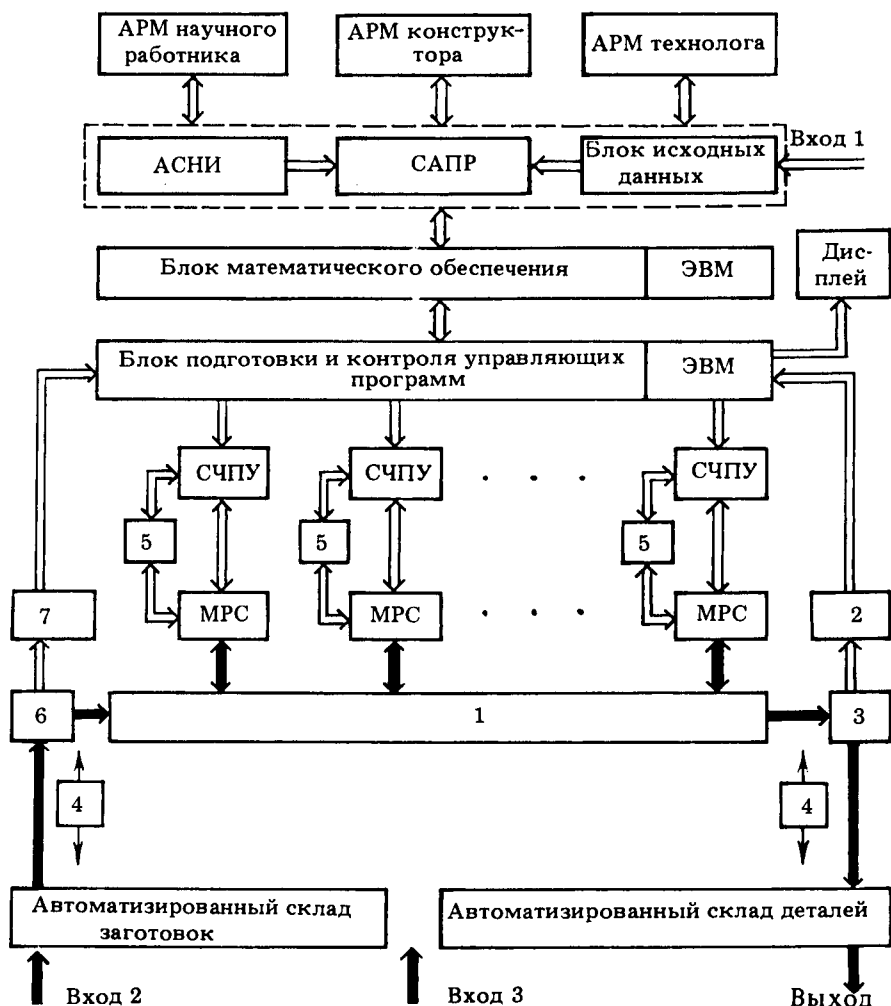


Рис. 1.7. Структура ГАП.

Структура ГАП (рис. 1.7) имеет три входа – информационный (1), материальный (2) и энергетический (3) – и один выход – готовые изделия. На основе технического задания САПР готовит информацию, содержащую необходимые данные для изготовления изделия.

В современном представлении САПР очень тесно смыкается с ГАП, так что их разделение нецелесообразно. В системе оперативного управления и планирования имеются: блок исходных данных, содержащий технологическую информацию (материалы режущего инструмента и изделия, режимы резания, количество деталей в партии и др.); блок математического обеспечения, осуществляющий подготовку программирующих программ на языке высокого

уровня; блок автоматизированной подготовки и контроля управляющих программ. Контроль программы осуществляется с помощью одного из дисплеев или графопостроителей, где по команде оператора вычерчивается траектория движения рабочего органа. Программа может контролироваться непосредственно у станка. Управляющая программа хранится в памяти ЭВМ или записывается на промежуточный программноноситель (перфоленду, магнитную ленту, магнитный диск). Управляющие программы поступают на системы ЧПУ, управляющие работой металлорежущих станков (МРС). Из автоматизированного склада заготовка 6 поступает на систему 1 установки заготовок и снятия обработанных деталей 3. Транспортировка заготовок и деталей производится транспортными роботами 4. Необходимые для работы инструменты находятся в магазинах 5. В отдельных случаях приведенная структура ГАП может включать в свой состав лишь один станок с системой ЧПУ.

Существенная функция ГАП — контроль качества, под которым, например, понимается измерение геометрических размеров изделий. С этой целью разработан ряд устройств, наиболее совершенные из которых предусматривают применение средств вычислительной техники. Простейшими устройствами являются одномерные средства активного контроля, служащие для применения на токарных и шлифовальных станках.

При большом количестве точек измерения (например, для корпусных деталей) используют трехкоординатные измерительные машины с ЧПУ, которые могут обслуживать группу станков или отдельные станки. Для контроля изделий в потоке применяются также измерительные роботы: одной из известных моделей является робот "Браво" (Италия), обладающий высокими динамическими показателями и гибкостью. Контроль качества изделий в реальном масштабе времени (т.е. в темпе их производства) позволяет не только оценить само изделие и зафиксировать его параметры (например, с выводом на цифровую печать или другой носитель информации), но и технологический процесс в целом. Активное вмешательство в ход технологического процесса весьма эффективно, когда выход измерительной машины 2 готовых деталей 3 соединяется с блоком подготовки управляющих программ с целью их корректировки (см. рис. 1.7). Адаптировать процесс обработки к изменяющимся параметрам заготовок позволяет измерительная машина 7, которая также соединена с блоком подготовки УП с целью их коррекции. Последнее позволяет повысить производительность металлообработки, например за счет учета отклонения реального значения припуска по сравнению с расчетным. На уровне разработки подлежащих изготовлению изделий и технологической подготовки их производства автоматизация обеспечивается применением автоматизированных рабочих мест (АРМ) научного работника, конструктора и технолога.

В зарубежной литературе применяются термины CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing), отражающие применение ЭВМ в проектировании и управлении. Довольно точным аналогом обозначения CAD является САПР. Что касается термина CAM, то он лишь показывает применение ЭВМ, не раскрывая структуры. За рубежом утвердился также термин FMS (Flexible Manufacturing System), под которым понимаются применяемые в отечественной практике гибкая технологическая система (ГТС) и гибкая производственная система (ГПС). Более всего термину ГАП соответствует зарубежное обозначение ICAM (Integrated Computer-Aided Manufactu-

ring) — интегрированное производство на основе ЭВМ. Частным случаем ГАМ является роботизированный технологический (робототехнический) комплекс (РТК), который представляет собой одну или несколько единиц технологического оборудования, взаимосвязанных единым циклом производства, при котором вспомогательные операции по перемещению заготовок и изделий осуществляются одним или несколькими ПР. Приведенное разнообразие терминологии отражает процесс ее становления.

Существует несколько признаков классификации РТК:

1) по виду технологического процесса (РТК механообработки, холодной штамповки,ковки, литья под давлением, производства изделий из пластмасс, термической обработки, сборки, дуговой сварки, точечной сварки, типа "автоматизированный склад", контроля и испытаний и др.);

2) по функциям, выполняемым ПР (РТК с выполнением основных технологических операций оборудованием, ПР, их комбинация);

3) по серийности и номенклатуре продукции (РТК без переналадки комплекса; с переналадкой комплекса);

4) по компоновке РТК (одна единица оборудования — один ПР; один ПР на несколько единиц оборудования; линейная компоновка; линейно-круговая компоновка; РТК со встроенным ПР);

5) по виду используемого транспорта (РТК с "жестким" транспортом — транспортеры, монорельсы и РТК с "гибким" напольным транспортом);

6) по виду применяемых роботов (РТК без адаптации к ходу технологического процесса; с адаптивным управлением);

7) по типу системы управления (РТК с централизованным, автономным и комбинированным управлением);

8) по степени участия человека (участие человека в технологических операциях (основных, транспортных, в тех и других); участие человека в управлении комплексом).

Остановимся более подробно на компоновке РТК, варианты которой изображены на рис. 1.8. В компоновках, показанных на рис. 1.8, а, б, в, ПР обслуживает одну или несколько единиц технологического оборудования, работающих независимо. Обслуживание нескольких единиц целесообразно при большом времени технологического цикла. На рис. 1.8, г ПР обслуживает несколько единиц оборудования, которое взаимосвязано единым технологическим процессом, поэтому в этой схеме имеется один вход и один выход. Схема, изображенная на рис. 1.8, д, отличается от предыдущих тем, что в ней используется дополнительная связь в виде транспортеров для заготовок и изделий. В схеме, данной на рис. 1.8, е, сам робот перемещается вдоль всей линии технологического процесса.

РТК могут строиться не только на базе специального, но также и универсального металлорежущего оборудования, что особенно актуально при модернизации предприятий. Согласно принятой в нашей стране классификации, все станки разделяются на девять групп, каждая из которых содержит девять типов. Стандартное обозначение станка состоит из буквенной и цифровой части. Буквенная часть обозначения указывает на некоторые конструктивные и технологические особенности модели, модификации и др. В цифровой части первая цифра совпадает с номером группы, вторая — с номером типа внутри данной группы, одна или две последующие цифры указывают на габаритный или

наиболее характерный размер станка (например, модель 2А135 обозначает станок вертикально-сверлильный, модифицированный, наибольший диаметр сверления 35 мм; модель 3750 – станок шлифовальный (3), плоского шлифования (7), диаметр стола в сантиметрах (50)).

Для станков с ЧПУ после указанной группы букв и цифр дополнительно вводят обозначения: Ф1 – станки с цифровой индикацией и преднабором координат; Ф2 – с позиционными системами ЧПУ; Ф3 – с контурными сис-

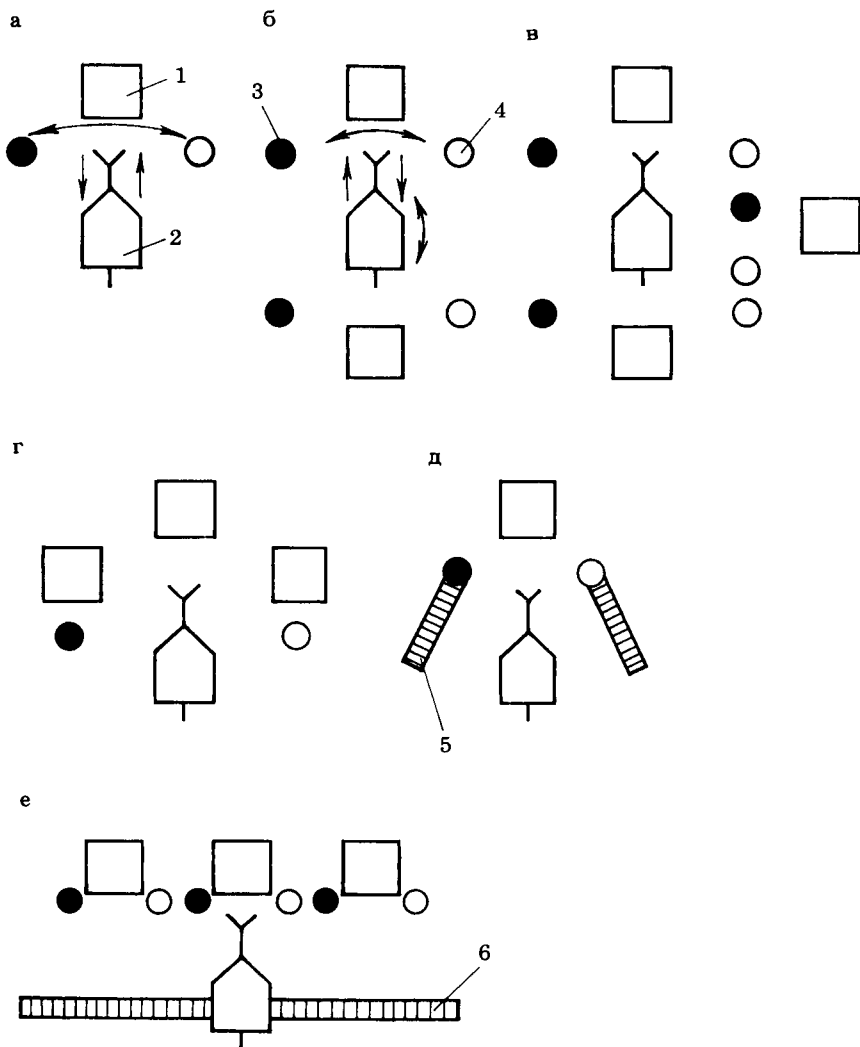


Рис. 1.8. Варианты компоновки РТК:

1 – технологическое оборудование; 2 – ПР; 3 – магазин заготовок; 4 – тара для готовых изделий; 5 – транспортер; 6 – трасса транспортного робота.

Обозначение		Определение
отечественное	международное	
ПУ		Программное управление. Управление станком по детерминированной программе
ЦПУ		Цикловое программное управление. Управление циклами перемещений или режимами обработки с заданием величин параметров на путевых переключателях или других измерительных преобразователей
ЧПУ	NC	Числовое программное управление (Numerical Control). Управление обработкой на станке по программе, заданной в алфавитно-цифровом коде
	HNC	Разновидность устройства ЧПУ (Hand NC) с ручным заданием программы с пульта управления с помощью различных переключателей
	SNC	Разновидность устройства ЧПУ (Speicher NC, Memory NC), имеющая память для хранения всей управляющей программы
ЧПУ-ЭВМ	CNC	Автономная система ЧПУ (Computer NC), содержащая в своем составе ЭВМ или микропроцессор для выполнения функций управления
ПЦУ, НЦУ	DNC	Система прямого (непосредственного) управления от групповой ЭВМ (Direct NC). Функции ЭВМ в такой системе заключаются в хранении программ и распределении их по запросам устройств управления станками
	VNC	Система программного управления, ввод программы в которую осуществляется непосредственно голосом оператора (Voice NC)
	TNC	Система ЧПУ, работающая в диалоговом режиме с оператором (Total NC)

темами; Ф4 – многооперационные станки с автоматической сменой инструмента и универсальными (позиционно-контурными) системами управления (например, модель 6P13Ф3 обозначает: станок фрезерный (6), вертикально-консольный (1), с револьверной головкой (Р), со столом третьего габарита (3), с контурной системой ЧПУ (Ф3)).

Программное управление в настоящее время распространилось на все виды металлорежущих станков, на многие другие промышленные установки. Устройства ЧПУ для каждого из видов оборудования имеют свои особенности, определяемые конструкцией, видом технологического процесса и возможностью связи с системой верхнего уровня.



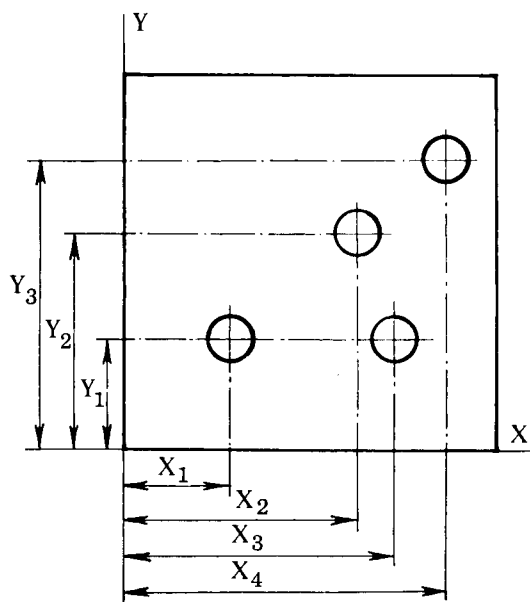
Рис. 1.9. Классификация систем ПУ.

Под системой ЧПУ понимается совокупность специализированных устройств, методов и средств, необходимых для осуществления управления оборудованием.

Собственно устройство ЧПУ (которое называют также пультом, стойкой) составляет часть этой системы и выполняется конструктивно обычно в виде отдельного шкафа. В последнее время в связи с совершенствованием микропроцессорной техники устройства ЧПУ на ее основе иногда встраиваются непосредственно в станок. Определения основных видов систем ПУ приведены в табл. 1.2.

На ранних этапах развития системы ЧПУ разрабатывались для каждого конкретного случая применения. Этот фактор и обилие фирм-изготовителей привели к тому, что на одном предприятии сосредоточивались разнообразные системы ЧПУ. При этом возникали естественные трудности их обслуживания и ремонта. Поэтому акцент был сделан на развитие унифицированных систем ЧПУ, пригодных для управления широким классом машин, называются *многоцелевыми*. Унификация многоцелевых систем ЧПУ основана на применении ЭВМ и систем класса CNC. Системы CNC имеют ряд разновидностей, отличающихся способами хранения и обработки управляющей информации. Одно из преимуществ многоцелевых систем ЧПУ заключается в организации ввода управляющей информации. В обычных системах программа первоначально составляется

а



б

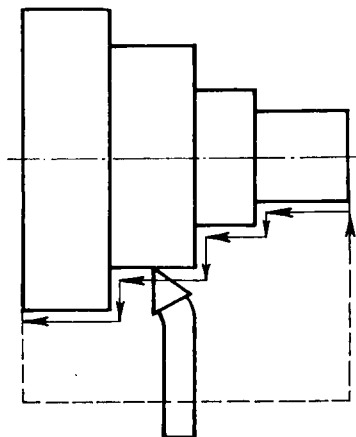


Рис. 1.10. Виды обработки при позиционных системах ЧПУ:

а — на сверлильном станке; б — на токарном.

в кодированном виде оператором (вручную или с помощью универсальной ЭВМ) и записывается на перфоленте. Затем с помощью интерполятора (специализированной ЭВМ) программа декодируется и записывается на МЛ или используется для управления РО станка непосредственно. При такой организации требуется несколько стадий отладки программы: исправление ошибок, допущенных при написании; коррекция перфоленты. Кроме того, в самом процессе ввода перфоленты, если даже на ней отсутствуют ошибки, они неизбежно возникают. На этап работы с перфолентой приходится до 70 % сбоев в системе ЧПУ. Применение ЭВМ позволяет исключить перфоленту и процесс фотоввода и объединить в общей системе подготовку управляющих программ и обработку изделий. Многоцелевые системы ЧПУ снабжаются комплексом алгоритмов и программ, который составляет системное программное обеспечение (СПО). Многоцелевые CNC системы объединяются с ЭВМ верхнего уровня, образуя систему DNC.

В зависимости от способа задания перемещения РО оборудования СПУ подразделяются согласно классификации, представленной на рис. 1.9. Временные системы не получили развития из-за низкой точности. Большую группу составляют цикловые системы ПУ, которые разделяются на два класса: с постоянным циклом и с настраиваемым. Системы с постоянным циклом характерны для "жесткой" автоматизации, и их настройка на другой цикл работы невозможна.

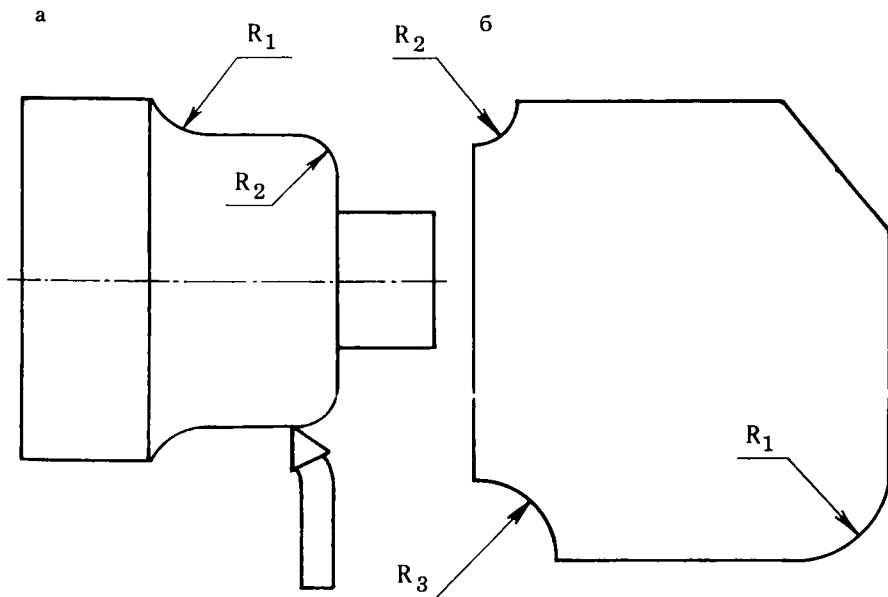


Рис. 1.11. Виды контурной обработки:
а – на токарном станке; б – на фрезерно-расточном.

Системы ЧПУ подразделяются на позиционные (координатные) и контурные (непрерывные). Первые обеспечивают перемещение (позиционирование) РО в заданные координаты, при этом траектория движения не оговаривается. Типичным примером позиционных систем является система ЧПУ сверлильного станка, когда стол перемещается в точки с координатами $X_1 Y_1$; $X_2 Y_2$ и т.д., где и происходит сверление отверстий (рис. 1.10, а). Позиционные системы ЧПУ применяются также при прямоугольном формообразовании детали вдоль одной из осей координат (рис. 1.10, б),

Контурные системы ЧПУ обеспечивают перемещение рабочих органов из одной точки в другую по заданной траектории (окружности, кривой более высокого порядка и др.). Виды контурной обработки представлены на рис. 1.11. По своей структуре контурные системы ЧПУ сложнее координатных и могут работать в режиме последних.

1.3. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КУЗНЕЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Задача автоматизации кузнечного производства весьма актуальна, так как труд рабочих кузнечных цехов характеризуется рядом условий – повышенной температурой, шумом, вибрацией, загазованностью, выполнением тяжелых физических и монотонных операций. Решение данной задачи связано со значительными трудностями, что объясняется сложностью операций с поковкой, резким изменением конфигурации поковок, необходимостью синхронизации работы технологического оборудования.

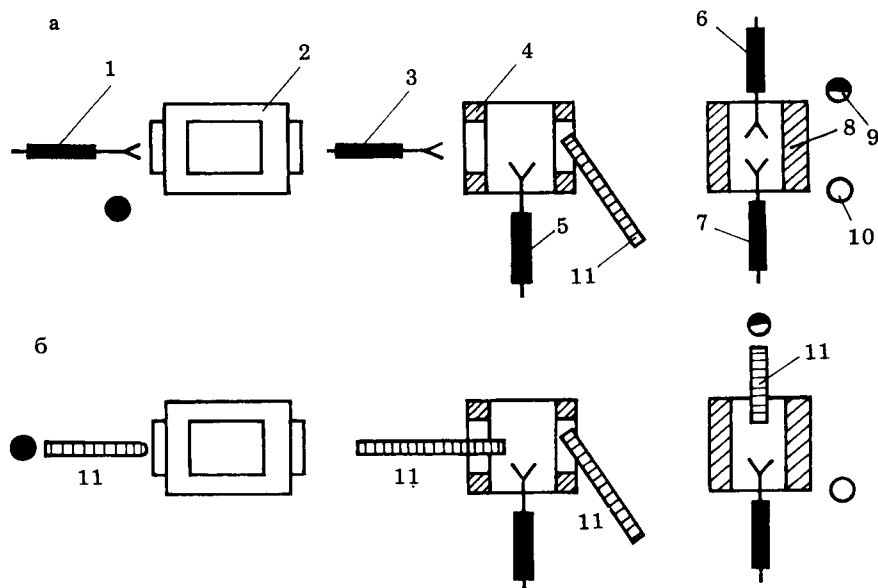


Рис. 1.12. РТК горячей штамповки.

Наиболее перспективными для роботизации являются линии штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП). Такие линии имеют индукционный нагреватель заготовок, КГШП и обрезающей пресс. Роботы таких РТК осуществляют перемещение заготовок между перечисленными единицами оборудования. Типовые структуры РТК отличаются расположением оборудования и ПР. На рис. 1.12, а показан РТК с пятью роботами: роботом-загрузчиком 1 заготовок в нагреватель 2; роботом-перекладчиком 3, осуществляющим перемещение нагретой заготовки из нагревателя на штамп КГШП 4; роботом-кузнцем 5; роботами 6 и 7, обслуживающими обрезающей пресс 8. Один из них укладывает облой в тару 9, а другой — готовые изделия в тару 10. Конвейер 11 подает штамповки в зону действия робота 7. При крупносерийном производстве часть роботов может быть заменена конвейерами (рис. 1.12, б). Ввиду сложности операции штамповки здесь не всегда удастся применить робот-кузнец. Тогда прибегают к частичной автоматизации с участием рабочего-кузнеца, который использует один из вариантов ковочного манипулятора.

Производительность труда может быть повышена применением двурукого робота-кузнеца для обслуживания КГШП. Такой робот левой рукой берет нагретую заготовку, правой — штамповку; поворотом рук заготовка укладывается в штамп, а штамповка сбрасывается в тару. Рабочий ход пресса выполняется лишь после возврата рук робота в исходное положение.

Для автоматизации кузнечного производства используются, как правило, роботы с цикловым управлением с пневмо- и гидроприводом ("Циклон-3Б", "Циклон-5" и др.), а также роботы с позиционным управлением типа "Универсал".

1.4. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ЛИСТОШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Листоштамповочное производство широко применяется в ряде отраслей промышленности, особенно в автомобильной, электротехнической, сельхозмашиностроении. В радиотехнической промышленности крепежные детали (основания, платы, скобы, кронштейны) также изготавливаются штамповкой. Роботизация листоштамповочного производства охватывает вспомогательные операции. Основная операция — процесс получения детали требуемой формы из заготовки — осуществляется с помощью штампов традиционной конструкции. Таким образом, роботизации подлежат операции: подача листа для резки на ножницах; штабелирование заготовок в виде листовых полос или карт различных размеров и транспортировка их на склад; загрузка заготовками кассет и транспортировка их к прессам; загрузка-разгрузка штампа; межоперационные и межштамповочные перемещения штамповок; складирование штамповок.

Специфическими условиями роботизации процессов холодной листовой штамповки являются: резкое изменение формы заготовки в процессе штамповки и необходимое в отдельных случаях удаление высечки; малое время цикла, измеряемое несколькими секундами, что предъявляет повышенные требования к быстродействию применяемых технических средств.

На основе анализа технологических процессов холодной листовой штамповки определены возможные структуры РТК: однооперационные позиции (робот-пресс); однооперационные поточные линии по схеме робот—пресс—... — робот, многопозиционные линии. В роботизированном производстве за каждым прессом закрепляется определенная операция и осуществляется упорядоченное перемещение штамповок по технологическому потоку из рабочей зоны одного ПР в зону следующего. Трудность ориентирования заготовок часто вызывает необходимость участия оператора. Один из возможных вариантов РТК с оператором приведен на рис. 1.13. Функция оператора 3 заключается в перегрузке заготовок, поступающих в тару 4, в подающий лоток 2. Дальнейший цикл работы происходит автоматически. Двухрукий робот 5 левой рукой извлекает штамповку из прессы 1, а правой берет заготовку из подающего лотка 2; затем обе руки поворачиваются влево на угол γ так, что левой рукой штамповка подается в приемный лоток 6, а правой в штамп. Во время процесса штамповки руки робота возвращаются в положение, показанное на рис. 1.13, и готовы к следующему циклу. Из лотка 6 штамповка подается в тару 7. Применение робота "Циклон-5Б" с двумя руками позволяет повысить производительность РТК на 20 %.

ПКТКУзробот (г. Таганрог) разработал автоматические манипуляторы для холодной штамповки типов КМ2.5Ц4214 и КМО.63Ц4212, которые имеют следующие технические данные: грузоподъемность (0,63—2,5) кг, точность позиционирования 0,1 мм, число степеней подвижности 2 и 4, максимальное число циклов в минуту — до 40, радиус обслуживания до 800 мм. Скоростные характеристики перемещений руки (м/с): горизонтального 1,34/0,6; вертикального 0,92/0,45, поворот захвата (рад/с) — 2 π /с.

Известен также комплекс, предназначенный для автоматической холодной штамповки из листовых штучных заготовок. В состав комплекса вхо-

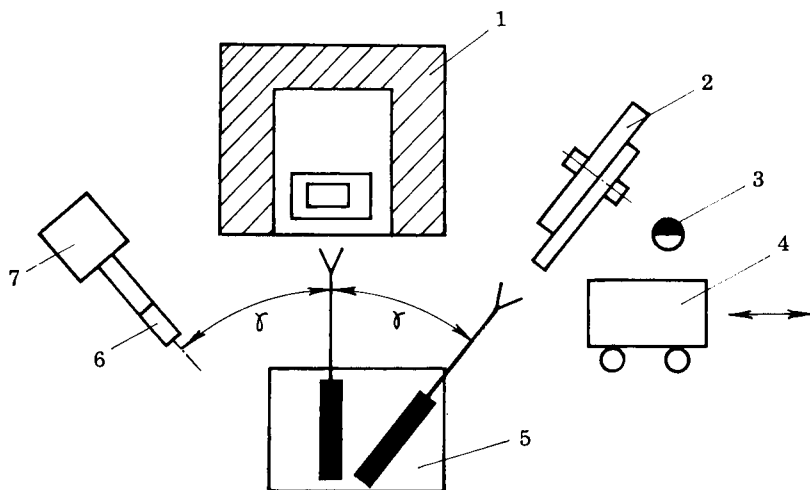


Рис. 1.13. РТК листовой штамповки с оператором.

дят: пресс модели КД2128Е, промышленный робот модели МА2.5Ц4201, магазинное устройство модели МУПР1. Комплекс обеспечивает автоматическую загрузку штампа прессы (при необходимости с ротацией заготовки), штамповку детали и сброс готовых изделий в тару.

Наличие датчиков технологического процесса позволяет одному оператору обслуживать два комплекса. Основные технические данные комплекса:

Номинальное усилие прессы, кН	630
Грузоподъемность робота, кг	2,5
Наибольшая масса заготовки, кг	1,25
Размер заготовки (из листового проката от 0,5 до 2,0 мм), мм	250 × 250
Точность позиционирования, мм	± 0,1
Тип системы управления	цикловая, УЦМ 663
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	81,404

1.5. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Литейное производство характеризуется тяжелыми, а порой и вредными для человека условиями работы, часто со значительной долей физического труда. Поэтому автоматизации технологических процессов литейного производства на базе промышленных роботов придается большое значение. РТК применяются при изготовливании форм и стержней, при очистке, обрубке отливок путем манипулирования пескоструйными или дробеструйными аппаратами, для очистки и обдува литейных форм и в ряде других операций. Для изготовления оболочковых форм используется автоматизированная линия модели 53414, состоящая из машины для изготовления полиформ и установки для их сборки. ПР изготовливают оболочковые стержни, загружают их в ли-

тейные формы, устанавливают готовые формы на конвейер. Для этих целей используются отечественные ПР "Универсал-15", "Универсал-90", зарубежные ПР "Versatran", "Asea", "Unimate" и др. Широкое распространение получили РТК литья под давлением (ЛПД).

Машины ЛПД однотипны по конструктивному использованию, что облегчает применение ПР для их автоматизации. В технологическом процессе ЛПД используется следующее основное оборудование: раздаточная электропечь с расплавленным металлом, машина ЛПД, установка для охлаждения отливок, обрубочный пресс для удаления облоя.

Процесс производства деталей методом ЛПД включает следующие операции: смазывание пресс-формы и пресс-поршня машины ЛПД смазочным материалом; взятие ковшом требуемой порции металла из печи; заливку металла в заливочное отверстие машины ЛПД; вытеснение жидкого металла пресс-поршнем в полость формы, где происходит затвердевание металла за счет некоторой выдержки времени; извлечение отливки, охлаждение ее и подачу в обрубочный пресс для отделения облоя и литниковой системы; подачу отливки в тару или на транспортер; очистку пресс-формы от остатков облоя и сгоревшей смазки, после чего процесс повторяется.

Трудоемкой операцией литейного производства является заливка металла в формы. Оператор здесь работает в тяжелых условиях, поэтому автоматизация данного процесса приобретает большое значение. Особое внимание уделяется дозировке металла — операции, требующей высокого мастерства рабочего и являющейся весьма трудоемкой. Автоматическая дозировка является многоплановой задачей, и ее решение зависит от технологического процесса литья: серийности продукции, расположения оборудования, количества печей с металлом, литейных машин и дозирующих установок.

Робот-дозатор мостового типа (рис. 1.14) состоит из вертикальной жесткой колонны, неподвижно закрепленной на полу цеха. К колонне крепится горизонтальная балка, опирающаяся при помощи кронштейна на машину ЛПД, что обеспечивает жесткость конструкции. По горизонтальной балке перемещается тележка, на конце которой закрепляется ковш. Сбоку от ковша устанавливаются электроды, служащие для подачи команды на останов при движении ковша вниз в зону расплавленного металла. Конструкция предусматривает легкую замену ковша. С погружением в ванну металл заполняет ковш через проделанное в дне отверстие до уровня, регулируемого электродами. При заполнении металлом ковш поворачивается, затем начинается его подъем. При выходе ковша из металла делается некоторая пауза, во время которой лишний металл стекает в ванну. Дозировка обеспечивается углом наклона ковша, что регулируется специальным кулачком. После подъема ковш перемещается в горизонтальном направлении, металл выливается в заливочное отверстие машины ЛПД, и ковш возвращается в исходное положение; робот готов принять новую команду.

Зона ожидания выбирается таким образом, чтобы конструкции робота не перегревались нагретым воздухом от металла. Приводы робота выполнены электрическими, так как жидкость гидравлической системы создает повышенную опасность при эксплуатации в таких условиях. Емкость ковшей различна, что позволяет дозировать металл в пределах 2—30 кг.

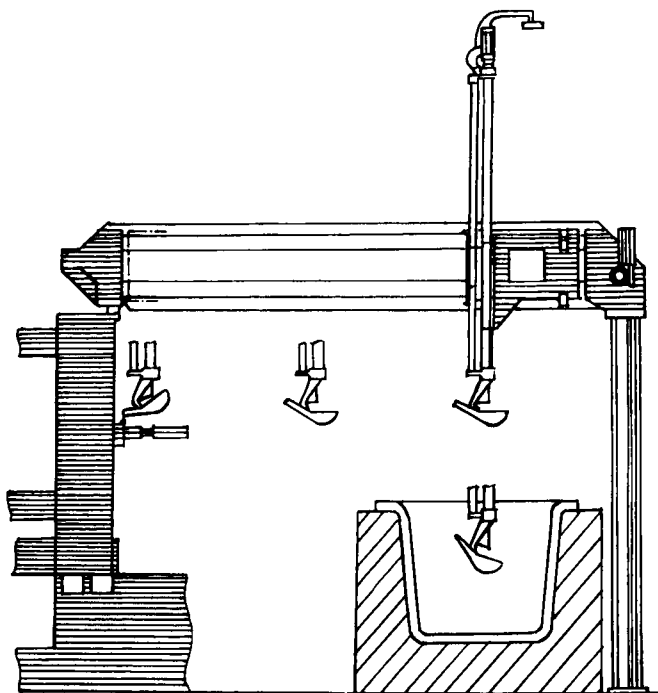


Рис. 1.14. Робот-дозатор мостового типа.

Пр итальянских фирм DOSAL и ITALPRESSE выполняют 150–200 циклов в час со следующими скоростными параметрами (м/с): при заборе и заливке — 0,045–0,5; при подъеме–спуске — 0,2–0,25; при перемещении — 0,95.

В нашей стране Тираспольским заводом литейных машин имени С.М. Кирова и Новосибирским заводом литейных машин и автоматических линий "Сиблитмаш" выпускаются РТК ЛПД, которые в зависимости от состава оборудования делятся на три типа: I — машины (А711А07, А711А08), II — комплексы (А711Б09), III — линии (АЛ711Б08, АЛ711Б09 и А711А10). В состав РТК, кроме машин ЛПД, входят: РТК-I — ковшовый манипулятор ДМ-4, стационарная форсунка для смазывания пресс-формы и толкатель для извлечения отливок. В состав РТК-II входят ковшовый манипулятор ДМ-4, подвижной блок форсунок и манипулятор модели АМ10Ц83.01; РТК-III — два манипулятора ДМ-4 и манипулятор РМ3А.

В состав РТК-III, кроме того, входит гидравлический обрубной пресс и автоматическое устройство для контроля полноты извлечения отливок и смазывания пресс-камеры.

Для автоматизации процесса литья на машинах ЛПД разработаны комплекты манипуляторов модели КОМ1.25Э и КОМ12.5. В состав комплекта КОМ1.25Э входит ковшовый манипулятор для заливки металла модели КОМ1.25Э.10, манипулятор для смазывания форм модели КОМ1.25Э.30, манипулятор для съема отливок модели КОМ1.25Э.20. Комплект КОМ12.5

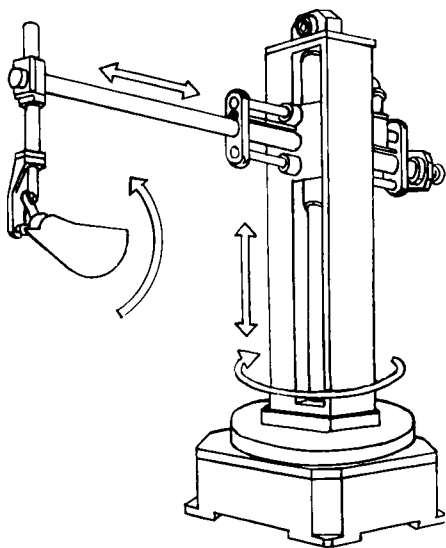


Рис. 1.15. Робот-заливщик.

включает ковшовый манипулятор для заливки металла модели ЛМ10Ц82.04 (вместимость ковша 1–10 кг) и манипуляторы для смазывания форм, съема отливок и сброса их в тару модели ЛМ10Ц83.01. Комплекты манипуляторов оснащены системой циклового ПУ модели УЦМ663.

Большая гибкость технологического процесса достигается возможностью заливки металла последовательно в несколько форм с индивидуальной дозировкой. Кроме того, металл может забираться из нескольких емкостей: регулируется также скорость заливки. Эти работы выполняются с помощью робота-заливщика (рис. 1.15), имеющего четыре степени подвижности. Такой робот может обслуживать до шести различных форм с программируемым процессом заливки. Циклы движения робота программируются заранее и хранятся в памяти системы управления.

1.6. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Обслуживание металлорежущих станков — одно из быстро растущих направлений применения ПР. В РТК механообработки входят несколько станков (или один станок) с ЧПУ и ПР, осуществляющие автоматизацию межпозиционных погрузочно-разгрузочных операций, объединенных системой компьютерного централизованного и местного управления.

РТК механообработки отличаются высокой производительностью многопозиционных станков-автоматов и возможностью быстрой переналадки станков с ЧПУ. Для решения вопросов автоматизации механообработки необходимо исследовать: 1) материал, размеры и массу обрабатываемых деталей; 2) технологические переходы; 3) виды и количество применяемых инструментов; 4) типы, характеристики и количество необходимых станков; 5) способ установки заготовки и последовательность обработки; 6) затраты машинного времени; 7) численность обслуживающего персонала.

К металлорежущим станкам для успешного функционирования в составе РТК предъявляются некоторые специфические требования. В первую очередь эти требования касаются системы размельчения и удаления стружки, часто содержащей стружкоуборочный конвейер; устройств контроля целостности инструмента; средств контроля обрабатываемых изделий; магазинов инструмента. Схемы РТК во многом определяются средствами подачи и ориентирования заготовок. Здесь необходимо выделить два вида: РТК с применением ПР, не обладающих адаптивными свойствами; РТК с применением адаптивных роботов, не требующих четкой ориентации заготовки. Оборудование, приме-

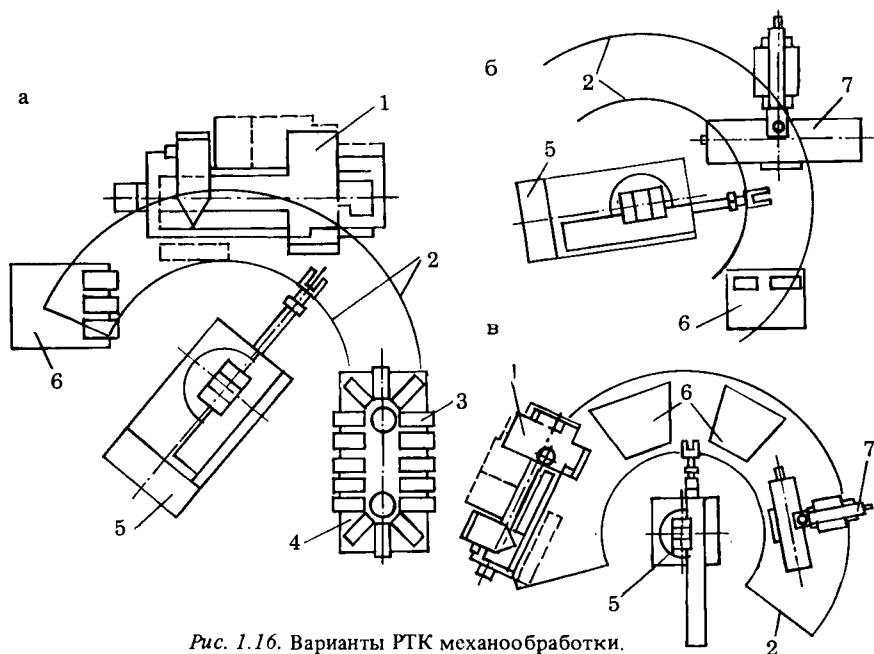


Рис. 1.16. Варианты РТК механообработки.

няемое в составе РТК, должно иметь совместимые системы управления; проще всего это достигается при применении систем типа CNC.

В настоящее время разработано и внедрено в практику большое число РТК механообработки с различными вариантами их компоновки (см. рис. 1.16). В простейшем варианте РТК строится по схеме станок—робот, которая показана на рис. 1.16, а, б. Робот 5, имеющий рабочую зону 2, обслуживает токарный станок 1 (см. рис. 1.16, а). Предварительно ориентированные заготовки 3 из магазина 4 подаются в станок 1; после обработки детали поступают в магазин 6. Заполнение магазина 4 производится оператором вручную или другим роботом. Возможен также вариант замены всего магазина с помощью транспортного робота: в этом случае его заполняют на автоматизированном складе. На схеме, приведенной на рис. 1.16, б, робот 5 обслуживает станок для обработки корпусных деталей 7. Заготовки и детали размещаются в магазине 6. На рис. 1.16, в робот осуществляет загрузку заготовок на два станка (токарный станок и станок для обработки корпусных деталей) и снятие обработанных деталей. Детали и заготовки размещаются в магазинах 6. Их координаты заранее известны и вносятся в систему управления ПР при программировании.

Удачной компоновкой РТК токарной обработки является применение ПР, установленного непосредственно на станке (рис. 1.17, а), где в его функции входит взятие заготовок 4 с конвейера 5, установка их в шпиндель станка 2, снятие обработанных деталей и установка их обратно на конвейер. После того как взята заготовка, конвейер перемещается на один шаг, подготавливая следующий цикл обработки. В этой схеме движения ПР 1 однотипны, что позволяет упростить процесс программирования и производить его непосред-

венно с пульта управления 3, также установленного на станке. Простота программирования объясняется тем, что при изменении формы детали изменяются лишь движения схвата ПР. При такой компоновке для ПР не требуется дополнительной площади. Движения механизмов робота приведены на рис. 1.17, б. Если деталь не может быть обработана на одном станке, возможна их

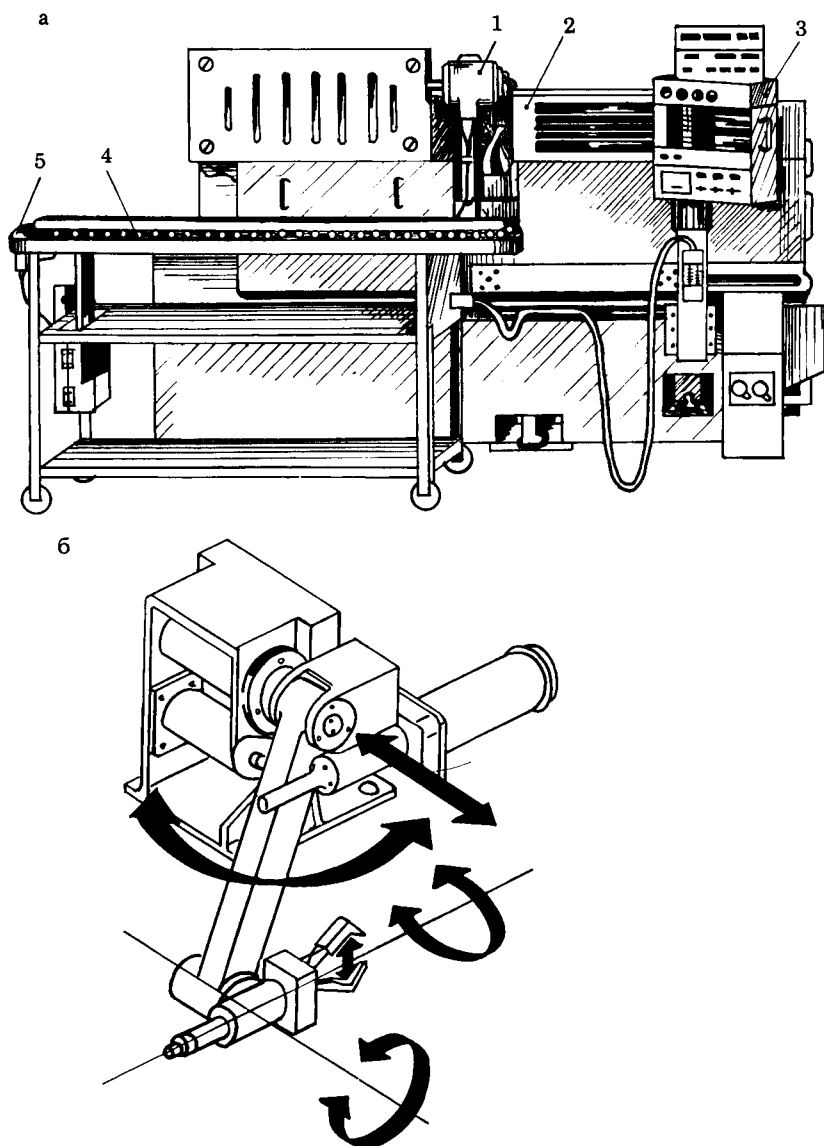


Рис. 1.17. РТК токарной обработки с пристроенным роботом (а) и схема движений робота (б).

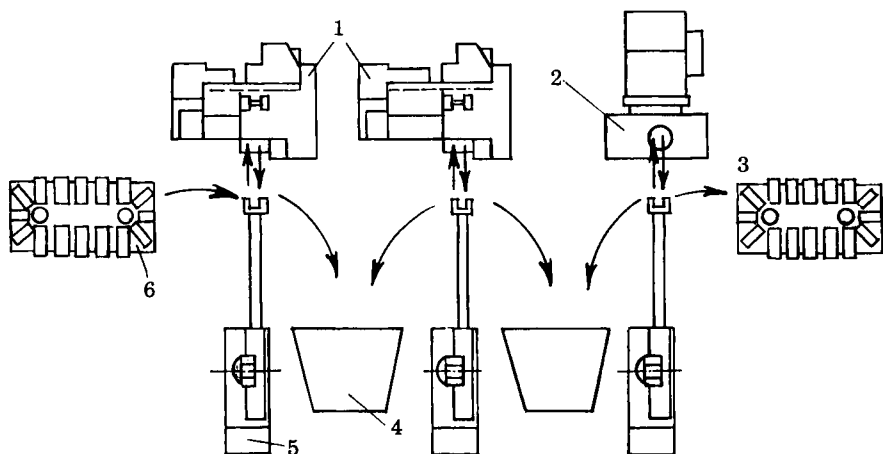


Рис. 1.18. РТК при последовательной обработке деталей.

установка в линию (рис. 1.18). В таком случае обработанная на первом токарном станке 1 деталь передается роботом 5 в промежуточный магазин 4, откуда с помощью второго робота помещается на второй токарный станок, затем на фрезерный станок 2. Входом линии является магазин заготовок 6 (слева), а выходом — магазин обработанных деталей 3 (справа).

Функционирование РТК токарной обработки длинномерных заготовок показано на рис. 1.19. В состав комплекса входят: отрезной станок, два токарных станка с ЧПУ, робот, конвейер. Длинномерная заготовка разрезается на части определенной длины с помощью отрезного станка. ПР устанавливает заготовки в токарные станки с ЧПУ и производит их центровку. РТК имеет развитую систему контроля инструмента, заготовок и изделий, информация от которой поступает на пульт управления.

Широко распространены РТК токарной обработки с портальным роботом (рис. 1.20). Кроме движений, обозначенных стрелками, ПР 1 имеет еще поворот схвата в двух координатах, что позволяет ему легко манипулировать заготовками, загружая и разгружая станки 3. Станки снабжены устройствами ЧПУ 2; подвод энергии к роботу производится гибким кабелем 4. В отдельных разработках применяются линейные двигатели. Заготовки в ориентированном виде помещаются в кассетах. Для ускорения процесса "загрузка-разгрузка" робот выполняется двуруким. На рис. 1.20, б приведен вариант кассеты с заготовками (детальками) для токарной обработки.

Компоновка оборудования РТК для мелкосерийного производства небольших деталей представлена на рис. 1.21. Его основой являются три обрабатывающих центра 1, 3, 5 с восьмипозиционным поворотным столом 4, служащим для подачи (приема) заготовок (деталей). Обслуживание станков производится одним роботом 10, который перемещает палеты с деталями (заготовками) от накопителей палет 9 к устройству для замены палет 12. Палеты со склада 6 подаются в рабочую зону ПР 10 с помощью транспортного робота 7, движущегося по трассе 8. Станки и робот снабжаются устройствами ЧПУ типа

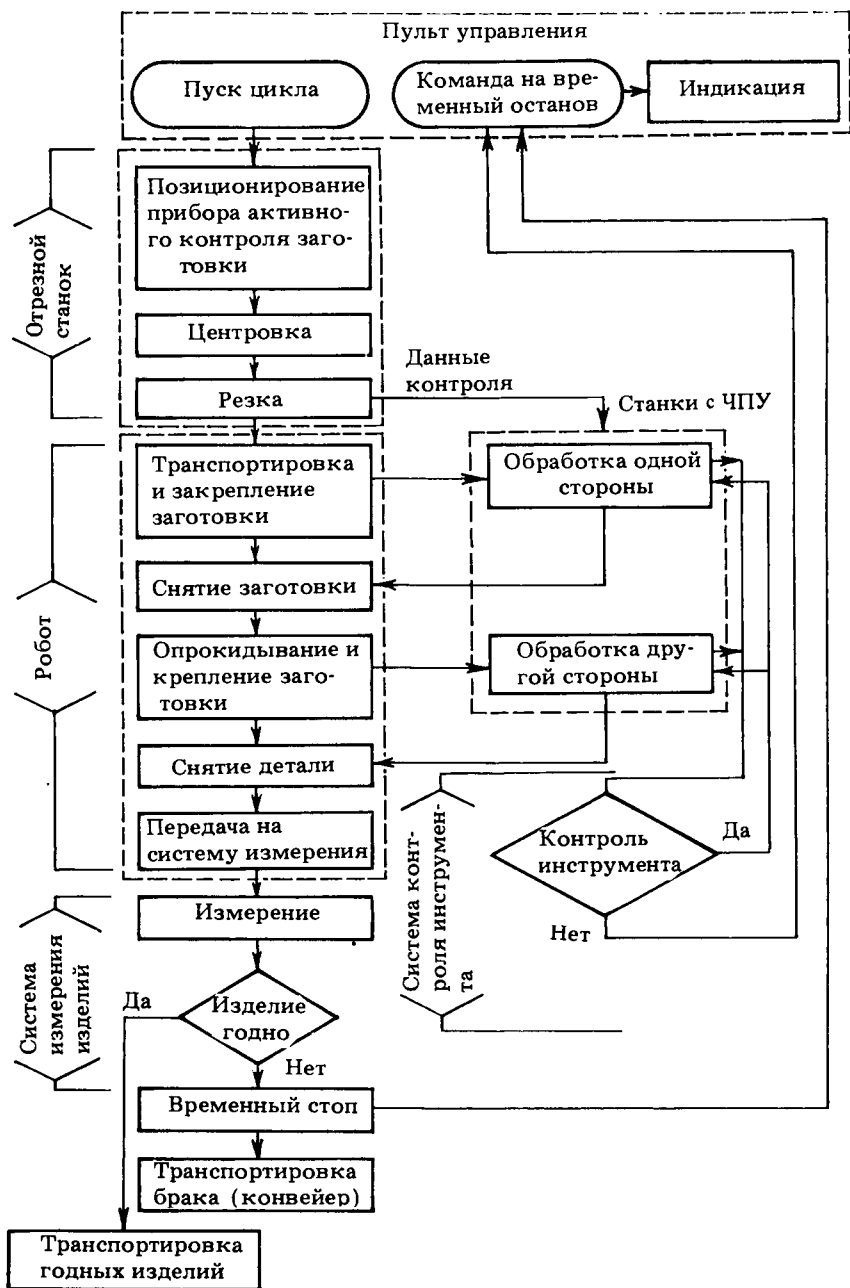


Рис. 1.19. Алгоритм функционирования токарной обработки длинномерных заготовок.

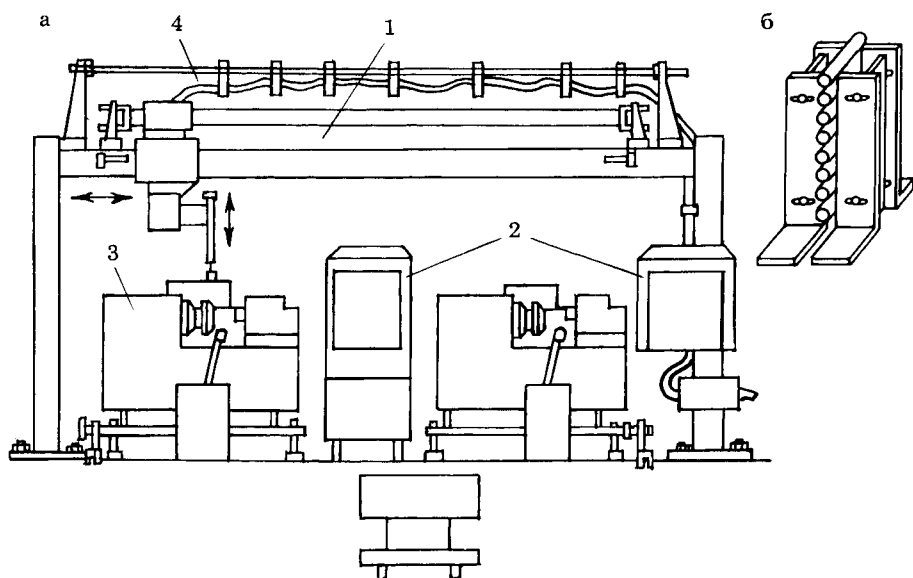


Рис. 1.20. РТК с роботом портального типа (а) и конструкция кассеты с заготовками (б) для токарной обработки.

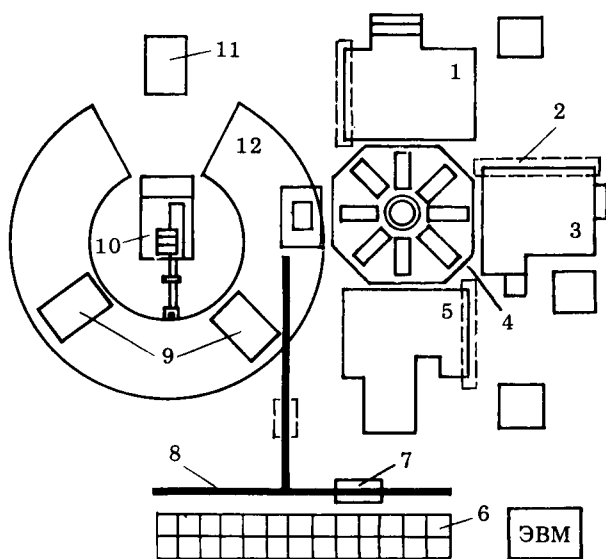


Рис. 1.21. РТК механообработки мелкосерийного производства.

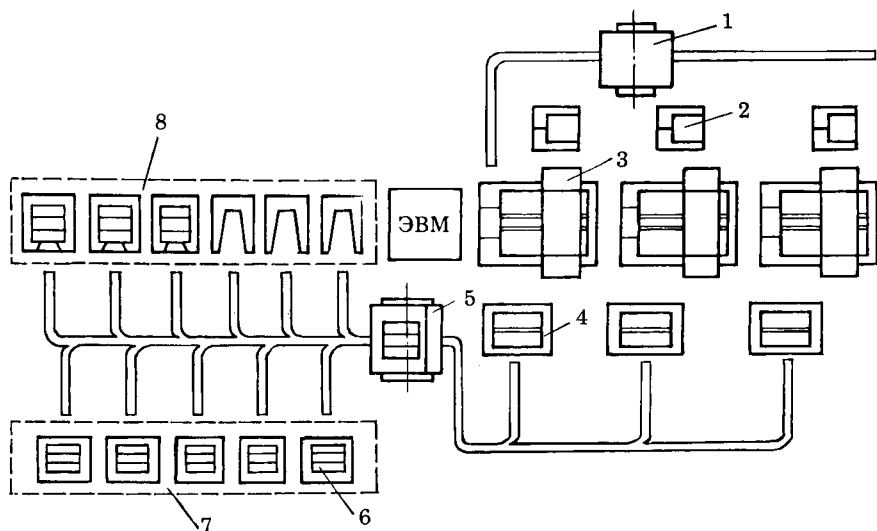


Рис. 1.22. РТК для обработки корпусных деталей.

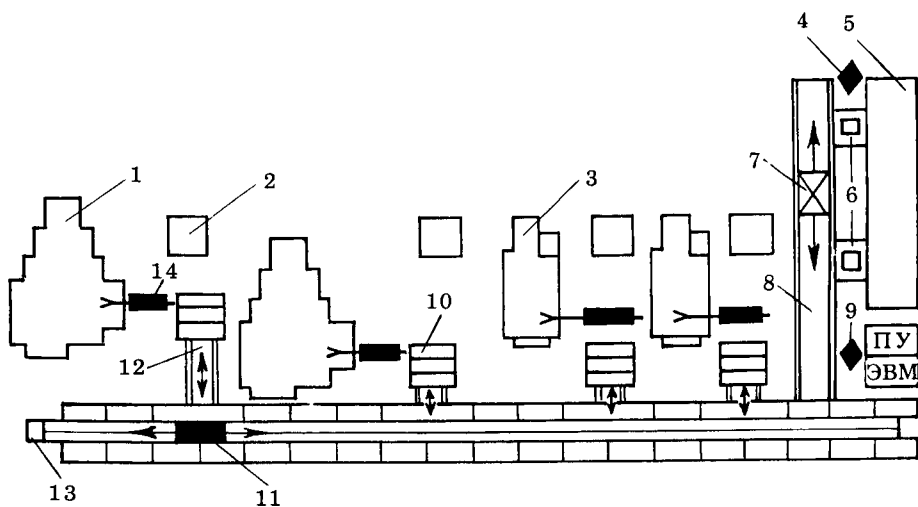


Рис. 1.23. Гибкий автоматизированный участок механообработки.

CNC 11, что обеспечивает совместимость с управляющей ЭВМ верхнего уровня. Кроме этого, станки имеют стружкоуборочные конвейеры 2.

На рис. 1.22 показан РТК для обработки крупных корпусных деталей. В позиции загрузки-разгрузки 7 заготовки устанавливаются на поддоны 6. Эта операция выполняется с участием оператора. Затем готовые поддоны транспортным роботом 5 подаются в позицию ожидания 8, а потом по мере необходимости подаются для обработки тем же роботом. По окончании механи-

ческой обработки поддоны с деталями возвращаются в позицию ожидания 8, где находятся до появления команды на транспортировку в позицию 7. Таким образом, позиция 8 является буферной и позволяет осуществить более гибкий график работы. Например, установка заготовок на поддоны может производиться в дневное время, а процесс обработки — круглосуточно (реализуется принцип безлюдной технологии).

Обработка деталей с пяти сторон производится на станках 3 типа "обрабатывающий центр". Перед установкой на станок заготовка поступает на промежуточную позицию 4 с помощью того же транспортного робота 5. При обработке требуются различные приспособления и инструмент, который подается вторым транспортным роботом 1 в накопители 2. Транспортные роботы управляются бортовыми компьютерами, осуществляющими адресацию, организацию движения при поворотах, позиционирование и другие необходимые функции. Общее управление РТК выполняет центральная ЭВМ по системе DNC.

В качестве примера приведем ГАУ механообработки, предназначенный для обработки корпусных деталей и тел вращения (рис. 1.23). В состав ГАУ входят вертикально-фрезерные (1) и токарные станки (3), системы ЧПУ станками и системы управления ПР (2), ПР типа ТУР-10К (14). Партия заготовок на складе 5 помещается в кассеты заводской унифицированной тары 6. Затем оператором 4 вручную осуществляется их перегрузка в кассеты 7 ГАУ. По команде диспетчера 9 с пульта управления кассеты по транспортеру 8 подаются на тележку 11 роботизированного транспортного комплекса 13, откуда с помощью транспортно-передаточного модуля 12 — к соответствующему станку (10 — фиксация кассет с заготовками у станка). Таким же путем транспортируется оснастка. Направления движения заготовок по транспортным устройствам показаны стрелками.

Для пуска станка необходимо участие наладчика, который производит смену инструмента, схвата робота, обработку и контроль первой детали, после чего станок переводится в автоматический режим.

Технико-экономические показатели ГАУ приведены в табл. 1.3 (вариант I). Как показывает опыт эксплуатации, в состав ГАУ можно ввести токарный патронно-центральный полуавтомат с ЧПУ модели 1716ПФ3. В будущем этот станок предполагается оснастить промышленным роботом, транспортно-накопительным оборудованием, системами автоматического измерения размеров инструмента и детали, что повысит степень его автоматизации. Фрезерные работы могут выполняться многоцелевым станком модели "Модуль ИР320ПМФ4", имеющим 12-местный накопитель столов-спутников, устройства для автоматической фиксации заготовки, смены инструмента и др.

На Могилевском заводе "Техноприбор" создан ГАУ для обработки тел вращения. Он содержит шесть токарных станков, два горизонтально-фрезерных станка, автоматизированный склад, транспортный робот и управляющие вычислительные комплексы. На заготовительном участке производится загрузка кассет заготовками и инструментом, после чего краном-штабелером они загружаются в ячейки и им присваивается код, который хранится в ЭВМ. По этому коду ЭВМ выдает команду крану-штабелеру, и кассета передается роботу, который транспортирует ее к станку; одновременно робота забирет кассеты от станков с инструментом или готовыми деталями. Данный ГАУ

Таблица 1.3

Показатели	Вариант I		Вариант II	
	Обычная техноло- гия	ГАУ	Обычная техноло- гия	ГАУ
Годовая программа деталей, тыс. шт.	790	790	200	200
Номенклатура деталей, наименований	88	88	90	90
Станкостоемкость на годовую программу, 10 ³ стан.-ч	35	18,5	60	30
Численность персонала, чел.	59	15	26	6
Количество единиц основного оборудо- вания, шт.	24	4	16	8
Стоимость основного оборудования, тыс.	785	540	347	1771
Коэффициент сменности основного обо- рудования	1,2	2,5	1,35	1,8
Коэффициент загрузки основного обо- рудования	0,7	0,85	0,65	0,9
Степень механизации труда, %	70	90	60	90
Годовой экономический эффект, тыс.р.	—	300	—	300
Рост производительности труда, %	—	400	—	150— 200

характеризуется высокими показателями, которые приведены в табл. 1.3 (вариант II).

Помимо названных станков, отечественной промышленностью внедрен в производство ряд станочных комплексов типа АСВ и АСК, разработанных ЭНИМСом. Для оснащения ГАП используются токарные станки модели ИБ11ПМФЗ, фрезерные станки модели ЛФ-260ФЗ, промышленные роботы, РФ-202М, РФ-204М, УМ160Ф2.81.01, СМ80Ц.48.11 и др.

1.7. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Автоматизация производства имеет решающее значение для повышения качества продукции. Новым научно-техническим решением проблем автоматизации является внедрение систем ПУ, РТК и ГАП на их основе. Роботизация производства позволит освободить человека от часто повторяемых производственных операций, особенно во вредных и тяжелых условиях работы. Роботизация дает возможность повысить сменность работы оборудования и в то же время исключить или значительно сократить ночные смены. Повсеместное использование роботов в будущем сократит продолжительность рабочего дня и расширит участие человека в общественной и культурной жизни, в управлении производством и обществом.

Технико-экономические показатели оборудования с ЧПУ значительно выше по сравнению с ручным управлением. Станочный парк с ручным управлением используется для непосредственной обработки лишь на 8—10 % от номинального фонда времени. Такой низкий показатель объясняется неполной загрузкой второй и третьей смен, выходными днями, перерывами на обед, потерей времени при смене инструмента. Как показывает опыт ВАЗа, станки с ЧПУ могут работать в три смены, причем коэффициент сменности составляет 1,3—1,6 при коэффициенте загрузки 75—85 %. Эффективность станков с ЧПУ может быть оценена следующими данными: один станок с ЧПУ может заменить 3—5 станков с обычным управлением; производительность труда повышается на 50 %; длительность цикла изготовления деталей сокращается на 60—80 %, повышается точность изготовления деталей, уменьшается брак. Особенно эффективно применение станков с ЧПУ в составе РТК и ГАП. Анализ применения РТК в различных отраслях промышленности и разных типах производства показывает их высокую эффективность как при мелкосерийном, так и при массовом производстве. Роботизация производства обеспечивает снижение себестоимости выпускаемой продукции в результате сокращения расходов на подготовку и освоение новой продукции; экономию заработной платы; увеличение коэффициента сменности оборудования; повышение коэффициента использования оборудования; снижение потерь от брака.

Обобщенные данные показывают, что производительность труда на роботизированном производстве возрастает в 2—3 раза.

По данным зарубежных специалистов, использование роботов дает 10—300 % прибыли; сроки окупаемости роботов 0,5—1 год (для менее дорогих) и 3—4 года (для дорогих). Срок окупаемости РТК, в состав которого входят ПР первого поколения грузоподъемностью до 5 кг, составляет 2,5—4 года; при грузоподъемности роботов до 50 кг — 5—6 лет. ПР должен окупаться за 9,35 года, наиболее вероятная цифра — 6,4 года.

При определении экономической эффективности робототехники часто не учитывают социальных факторов, которые сводятся к следующему: робот не нуждается в жилье и детских учреждениях; ему не нужен городской транспорт и столовая; ему не требуется бюллетень, отпуск, пенсия и другие социальные блага. Все эти факторы необходимо учитывать. Ввиду трудности их точного определения рекомендуется величину рассчитанного эффекта увеличить на 10 %.

При разработке РТК могут возникнуть две задачи: создание РТК для существующего производства и разработка РТК для вновь организуемого производства. Первая задача является наиболее актуальной и наиболее сложной, так как при ее решении приходится учитывать многочисленные организационно-технические ограничения. Вторая задача возникает при проектировании новых предприятий, и ее реализация требует значительных капитальных затрат. Как отмечалось, основной структурной единицей любого ГАП является РТК, с которого и начинается решение автоматизации. Прежде чем приступить к созданию РТК, производят предпроектное обследование производства, результатом которого является модель объекта. Этапы проектирования определяют последовательный набор решаемых задач: 1) определение экономической эффективности разработки РТК; 2) нахождение входного и выходного материальных потоков; 3) обоснование номенклатуры и количества выпускае-

мой продукции; 4) выбор типа оборудования и количество его единиц; 5) проектирование транспортно-складской системы; 6) решение вопросов технологического контроля; 7) выбор типа и количества промышленных роботов; 8) проектирование системы управления РТК (стыковка систем управления технологическим оборудованием, роботом, транспортно-складской системы) и ее связь с системой высшего ранга.

Оценка экономической эффективности применения РТК проводится путем комплексного технико-экономического анализа с учетом особенностей технологического процесса, организационных и технических мероприятий, социальных факторов. Для такого анализа принимаются во внимание: технологическое оборудование и степень его автоматизации; промышленные роботы; транспортно-складские системы для заготовок, изделий и инструмента; система управления РТК; гибкость производства, которая оценивается возможностью быстрой смены типа обрабатываемых деталей; производственные площади; требуемый запас деталей.

Оценку экономичности внедрения РТК производят по годовому экономическому эффекту, определяемому как экономия годовых приведенных затрат. Для сопоставления выбирается базовый вариант — лучший существующий аналог (РТК или неавтоматизированное производство).

Приведенные затраты i -го варианта определяются по формуле:

$$Z_i = C_i + E_n K_i,$$

где C — себестоимость; $E_n K$ — нормативная прибыль; $E_n = 0,15$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат; K — капитальные затраты.

В составляющую себестоимости входят годовые затраты на амортизацию оборудования и его ремонт, зарплату со всеми начислениями, годовые эксплуатационные затраты данного варианта.

Годовой экономический эффект в сравнительной оценке

$$\mathcal{E} = Z_t - Z'_t + \Delta Z_c,$$

где Z_t , Z'_t — приведенные затраты соответственно до и после внедрения РТК в t -м году; ΔZ_c — затраты, отражающие условия труда на предприятии (социальное обеспечение рабочих, пострадавших от производственных травм; оплата листов нетрудоспособности; потери прибавочного продукта в связи с производственными травмами). Ввиду сложности учета составляющих, входящих в ΔZ_c , рекомендуется для укрупненных расчетов принимать $\Delta Z_c = (0,17 - 0,26) C \cong 0,2C$.

Приведенные затраты базового варианта учитывают качественные различия по сравнению с внедряемым вариантом введением коэффициентов качества: $Z_t = a_1 a_2 a_3 Z'_t$, где a_1, a_2, a_3 — коэффициенты качества, учитывающие различия в годовых объемах работ (a_1), различия в производительности базового и внедряемого вариантов (a_2), различия в сроках службы оборудования с учетом морального износа (a_3). Названные коэффициенты находятся как отношения соответствующих величин для каждого из вариантов.

Определим срок окупаемости T дополнительных капитальных вложений,

требуемых для реализации предлагаемого варианта РТК:

$$T = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2},$$

где индексы 1 и 2 относятся к базовому и новому вариантам.

За нормативный срок окупаемости принят срок 6, 7 лет. Для отечественных РТК этот срок находится в пределах 2,5–6 лет.

2. СИСТЕМЫ ЦИКЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

2.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЦИКЛОВЫХ СИСТЕМ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Значительная часть оборудования промышленных предприятий выполняет обработку однотипной продукции с редкой сменой циклов движений. Автоматизация работы такого оборудования решается с помощью систем циклового программного управления (ЦПУ). Удачно выбранная система циклового программного управления оборудованием обеспечивает гибкость его автоматизации, т.е. возможность перехода на выпуск нового изделия в пределах определенной номенклатуры, и устраняет противоречия между сроками и стоимостью изготовления специального оборудования и сроками обновления выпускаемого изделия. *Циклом* называется совокупность элементарных операций, осуществляемых в определенной последовательности, обеспечивающих выполнение оборудованием рабочих функций.

Элементарные операции разделяются на рабочие и вспомогательные и называются этапами цикла или тактами работы системы. В течение этапа цикла в системе не происходит изменений в состоянии управляющих воздействий. Этапы цикла характеризуются параметрами – скоростью и направлением перемещения рабочего органа, наличием смазки и охлаждения, видом режущего инструмента и т.д.

Применительно к металлообработке параметры рабочих этапов цикла определяют режимы обработки. В системах ЦПУ программа содержит в числовом виде только информацию о цикле и режимах обработки, а величину перемещения рабочих органов задают настройкой кулачков, упоров и других датчиков перемещений.

В обобщенном виде система ЦПУ представлена на рис. 2.1. Программа работы оборудования в виде этапов цикла формируется в блоке задания и запоминания программы. С помощью блока поэтапного ввода команды программы вводятся в исполнительный механизм через блок связи с объектом. Режим работы системы, т.е. переход от выполненного этапа цикла к следующему, зависит от положения рабочего органа, которое контролируется устройствами обратной связи. В качестве последних широко применяются различные путевые переключатели, микропереключатели, по команде которых блок поэтапного ввода программы приступает к опросу программы очередного этапа цикла.

Основой проектирования системы ЦПУ является алгоритм управления объектом, определяемый его структурой и технологическими особенностями. Существует несколько способов задания алгоритмов.

Наглядное графическое изображение последовательности работы оборудования может быть получено с помощью циклограмм. Их применяют при сос-

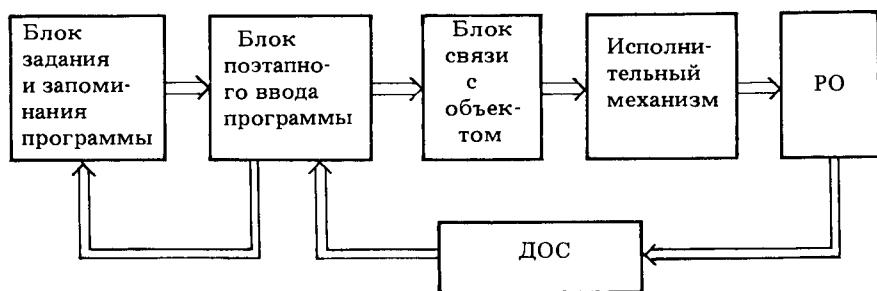


Рис. 2.1. Функциональная схема системы циклового программного управления.

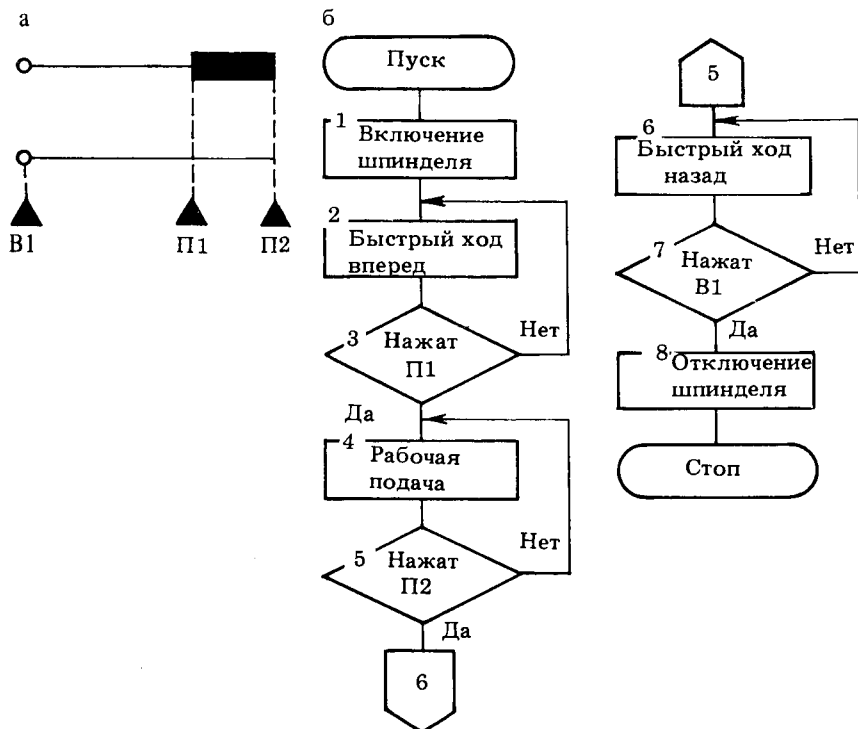


Рис. 2.2. Циклограмма (а) и алгоритм работы силовой головки (б).

тавлении задания на разработку системы управления, при составлении различных эксплуатационных инструкций.

Циклограмма работы силовой головки станка дана на рис. 2.2, а. В цикле работы силовой головки станка можно выделить следующие этапы: включение шпинделя — быстрый ход вперед (P1), рабочая подача (P2) — быстрый ход назад в исходное положение (B1) — отключение шпинделя. Смена этапов цикла происходит при срабатывании переключателей P1, P2 и B1.

На основе циклограммы нетрудно составить схему алгоритма (рис. 2.2, б), в которой логические блоки 3, 5, 7 осуществляют контроль состояния соответствующих переключателей.

Алгоритм управления может быть также представлен с помощью логических уравнений (условий). На основе элементарных логических условий составляются сложные функции, определяющие порядок работы функциональных узлов схемы.

Широкое распространение получили схемы алгоритмов, где операции изображаются последовательно. Применяются также логические схемы алгоритмов, в которых последовательность операций и логических условий записывается в одну строчку. Описание работы релейных и микроэлектронных дискретных устройств осуществляется табличным способом, на основании которого легко можно перейти к записи программы для ЭВМ.

Системы ЦПУ различают по виду блока задания и запоминания программы — программатора. Программаторы бывают механические, гидравлические, пневматические и микроэлектронные. Программаторы механического типа разнообразны по конструкции. Следует выделить два вида программаторов: кулачковые и с перфорированными программноносителями (перфолентой и перфокартой).

Одной из разновидностей программатора является штекерная панель, представляющая собой прямоугольную решетку из горизонтальных и вертикальных металлических шин. В местах их пересечения имеются гнезда. Шины соединяются друг с другом с помощью штекеров. Штекеры вставляют в соответствующие гнезда панели и получают схемы, обеспечивающие различные программы работы механизмов. Требуемая последовательность этапов автоматической обработки обеспечивается подачей командных импульсов. Командные импульсы подаются либо от генератора импульсов, либо формируются исполнительным устройством по окончании этапа цикла.

Для ускорения процесса программирования применяется бумажный трафарет. Его подготавливают заранее и затем штекеры вставляют в отверстия, имеющиеся на трафарете. Если возможные циклы работы оборудования известны, то для каждого из них может быть подготовлен трафарет.

Для считывания программы вместо шаговых искателей применяют релейные счетные схемы. Подача командного импульса на считывание программы осуществляется датчиком обратной связи, который "отключает" исполнение предыдущей команды.

В системах ЦПУ применяется также аппаратное, микропрограммное и программное управление. При аппаратном способе управления формирование циклов осуществляют набором схем, при построении которых используются релейно-контактная или бесконтактная аппаратура. Ряд повторяющихся циклов задают в закодированном виде, что облегчает программирование и уменьшает ошибки.

В настоящее время устройства систем ЦПУ изготавливают на микроэлектронной основе. В связи с повышенной стоимостью такой аппаратуры ее применение оправдано, если число релейно-контактных аппаратов эквивалентной схемы больше 60—80, а также при напряженных циклах работы.

2.2. ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

2.2.1. Пороговые элементы

Устройство бесконтактной автоматики строят на базе пороговых элементов (ПЭ).

Пороговым называется элемент с двоичными входами $x_1, \dots, x_i, \dots, x_p$ и одним выходом y , у которого каждому входу x_i приписан свой "вес" ξ_i . Сигнал y приобретает значение 1 только тогда, когда сумма всех входов с учетом веса превышает некоторый порог η :

$$y = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^p \xi_i x_i \geq \eta; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^p \xi_i x_i < \eta. \end{cases} \quad (2.1)$$

Логическая формула (2.1) порогового элемента записывается также в виде

$$y = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^p \xi_i x_i - \eta \right) = \text{sgn} Z,$$

где
$$\text{sgn} Z = \begin{cases} 1 & \text{при } Z \geq 0; \\ 0 & \text{при } Z < 0. \end{cases}$$

Функциональная схема и графическое изображение ПЭ показаны на рис. 2.3.

Структурой ПЭ называется упорядоченный набор $\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p, \eta\}$. Используя ПЭ, можно реализовать различные логические функции нескольких переменных. С помощью одного ПЭ, изменяя высоту порога, получают различные структуры, выражающие различные логические функции входных переменных. Например, элемент со структурой $\{3, 1, -2, \eta\}$ при значениях $\eta = \{-1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ "действует" в соответствии с данными табл. 2.1.

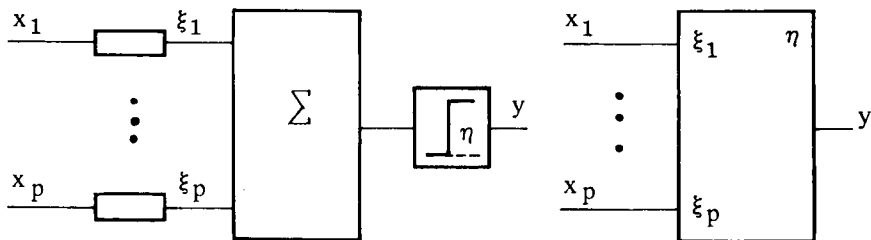


Рис. 2.3. Пороговый элемент.

Таблица 2.1

x_1	x_2	x_3	$\sum_{i=1}^3 x_i$	у при значениях η					
($\xi_1 = 3$)	($\xi_2 = 1$)	($\xi_3 = -2$)		-1	0	1	2	3	4
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
1	0	0	3	1	1	1	1	1	0
0	1	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	-2	0	0	0	0	0	0
1	1	0	4	1	1	1	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	-1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	2	1	1	1	1	0	0

В соответствии с табл. 2.1 можно привести логические функции, реализуемые пороговым элементом $\{3, 1, -2, \eta\}$ при различной высоте порога η :

η	-1	0	1	2	3	4
y	$x_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_1$	$x_1 \vee \bar{x}_3$	$x_1 \vee x_2 \bar{x}_3$	$x_1 (x_2 \vee \bar{x}_3)$	$x_1 \bar{x}_3$	$x_1 x_2 \bar{x}_3$

Частным случаем пороговых элементов являются мажоритарные элементы. *Мажоритарным* называется элемент с нечетным числом p двоичных входов и одним выходом y , реализующий функцию M_{aj} , называемую *мажорантой*. Мажоранта может быть выражена соотношением

$$y = \begin{cases} 1, & \text{если } r \geq (p+1)/2; \\ 0, & \text{если } r < (p+1)/2, \end{cases} \quad (2.2)$$

где r — число входов, на которых входные переменные имеют значение логической 1.

Из (2.2) следует, что необходимым и достаточным условием получения сигнала 1 на выходе мажоритарного элемента является наличие сигнала 1 на большинстве входов элемента. Для $p = 3$ мажоритарный элемент эквивалентен пороговому элементу со структурой $\{1, 1, 1, 2\}$. Символическое обозначение мажоранты в этом случае имеет вид

$$y = M_{aj}(x_1, x_2, x_3) = x_1 \# x_2 \# x_3.$$

Для элемента с тремя входами

$$x_1 \# x_2 \# x_3 = x_1 x_2 \vee x_1 x_3 \vee x_2 x_3 = S_{2,3}.$$

Символ $S_{2,3}$ показывает, что мажоранта имеет значение 1, если сигнал 1 имеет место на двух или трех входах (сумма S входов равна 2 или 3).

Конъюнкция и дизъюнкция двух переменных могут рассматриваться как частные случаи мажоранты при постоянном значении одной из переменных.

Например,

$$y = \begin{cases} x_1 \# x_2 \# 0 = x_1 x_2 & \text{при } x_3 = 0; \\ x_1 \# x_2 \# 1 = x_1 \vee x_2 & \text{при } x_3 = 1. \end{cases}$$

Для мажоритарных элементов справедливы следующие равносильности:

$$\overline{x_1 \# x_2 \# x_3} = \overline{x_1} \# \overline{x_2} \# \overline{x_3}$$

или

$$M_{af}(x_1, x_2, x_3) = \overline{S}_{2,3} = M_{af}(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \overline{x_3}) = S_{0,1};$$

$$x_1 \# x_1 \# x_2 = x_1;$$

$$x_1 \# \overline{x_1} \# x_2 = x_2;$$

$$x_1 \# x_2 \# (\overline{x_1} \# \overline{x_2} \# x_3) = x_1 \# x_2 \# x_3;$$

$$x_1 \# (\overline{x_1} \# \overline{x_2} \# x_3) \# (\overline{x_1} \# \overline{x_2} \# x_3) = x_1 \# x_2 \# x_3.$$

Пороговый элемент, выходная функция которого соответствует выражению

$$y = \begin{cases} 1 & \text{при } |W| \geq \eta; \\ 0 & \text{при } |W| < \eta, \end{cases}$$

называется *модульным*. Здесь $W = \sum_{i=1}^p \xi_i x_i$.

Элементы типа И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, мажоритарные элементы являются частными случаями ПЭ. Например, схема И на p входов реализуется ПЭ (см. (2.1)), если $\xi_i = 1$ и $\eta = p$. Схема ИЛИ реализуется, если $\xi_i = 1$ и $\eta = 1$.

2.2.2. Мостиковые логические схемы

Релейные и логические схемы по своей структуре делятся на параллельно-последовательные (класс П) и мостиковые (класс Н).

Для нахождения логической функции, реализуемой мостиковой схемой, может быть применен матричный метод. Для построения матрицы схемы класса Н нумеруются все узлы схемы и обозначаются соответствующими символами контакты (логические условия) в ветвях, соединяющих узлы. Элементами g_{ij} матрицы M являются проводимости ветвей, соединяющих соседние узлы (вершины или полюса) схемы. При этом полагают, что в зависимости от состояния контактов (значения логических переменных) $g_{ij} = 0$ или 1.

Например, матрица схемы, приведенной на рис. 2.4, имеет вид

$$M = \begin{bmatrix} 1 & a & b & 0 \\ a & 1 & e & c \\ b & 0 & 1 & d \\ 0 & c & d & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

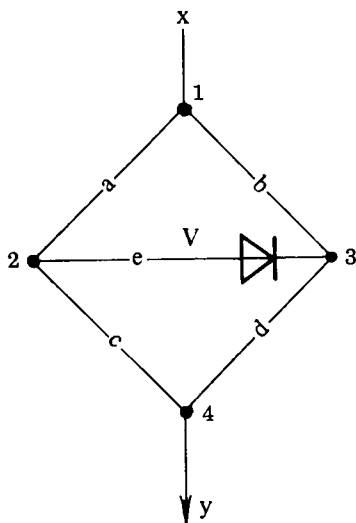


Рис. 2.4. Мостиковая схема с диодом.

Проводимость схемы между узлами i и j равна определителю минора G_{ij} , получаемого вычеркиванием i -го столбца и j -й строки матрицы. При этом вычисление определителя структурной матрицы (минора) отличается от вычисления определителя обычной алгебраической матрицы тем, что все слагаемые определителя положительны (отсутствует множитель $(-1)^r$, входящий в слагаемые определителей алгебраических матриц).

Для нашего примера выходной сигнал схемы $y = G_{14}x$, где G_{14} — минор, получаемый из (2.3) вычеркиванием первого столбца и четвертой строки

$$G_{14} = \begin{vmatrix} a & b & 0 \\ 1 & e & c \\ 0 & 1 & d \end{vmatrix} = aed + bc0 + 011 + 0e0 + b1d + ac1 = aed + bd + ac.$$

Наличие вентилей в схеме создает несимметрию структурной матрицы, при составлении которой проводимость вентилей принимается равной 1 или 0 в зависимости от направления его включения.

2.2.3. Комбинационные схемы на мультиплексорах (коммутаторах)

Мультиплексор (коммутатор) представляет собой логический элемент, имеющий несколько входов и один выход. Выход мультиплексора может быть парафазным (т.е. прямым и инверсным).

Входы мультиплексора подразделяются на управляющие, информационные и стробирующие. При подаче на управляющие входы сигнала, образующего определенный двоичный код, выход коммутатора присоединяется к информационному входу, номер которого соответствует коду управляющего сигнала.

Мультиплексоры выполняются на интегральных схемах малой и средней интеграции (МИС и СИС). Например, в состав серии К155 входят двоянные коммутаторы из 4—1 типа К155КП2, 8—1 типа К155КП7 и 16—1 типа К155КП1. Условные обозначения этих коммутаторов показаны на рис. 2.5.

Логические уравнения коммутаторов имеют вид:

$$F_{4-1} = B_1 \bar{A}_1 \bar{A}_2 + B_2 \bar{A}_1 A_2 + B_3 A_1 \bar{A}_2 + B_4 A_1 A_2; \quad (2.4)$$

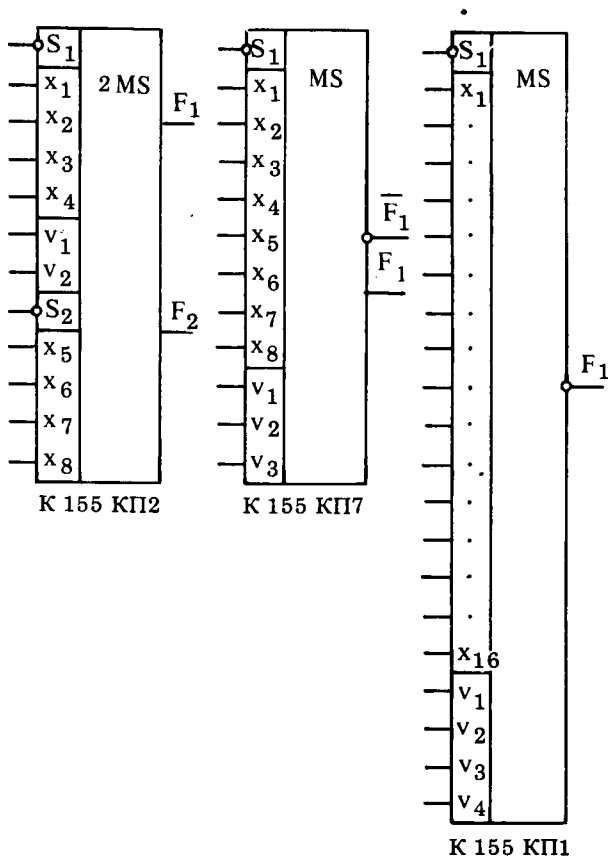


Рис. 2.5. Условные обозначения коммутаторов (мультиплексоров).

$$\begin{aligned}
 F_{8-1} = & B_1 \bar{A}_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 + B_2 \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3 + B_3 \bar{A}_1 A_2 \bar{A}_3 + B_4 \bar{A}_1 A_2 A_3 + \\
 & + B_5 A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 + B_6 A_1 \bar{A}_2 A_3 + B_7 A_1 A_2 \bar{A}_3 + B_8 A_1 A_2 A_3 ; \\
 F_{16-1} = & B_1 \bar{A}_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 \bar{A}_4 + B_2 \bar{A}_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 A_4 + B_3 \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3 \bar{A}_4 + \\
 & + B_4 \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3 A_4 + B_5 \bar{A}_1 A_2 \bar{A}_3 \bar{A}_4 + B_6 \bar{A}_1 A_2 \bar{A}_3 A_4 + \\
 & + B_7 \bar{A}_1 A_2 A_3 \bar{A}_4 + B_8 \bar{A}_1 A_2 A_3 A_4 + B_9 A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 \bar{A}_4 + \\
 & + B_{10} A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 A_4 + B_{11} A_1 \bar{A}_2 A_3 \bar{A}_4 + B_{12} A_1 \bar{A}_2 A_3 A_4 + \\
 & + B_{13} A_1 A_2 \bar{A}_3 \bar{A}_4 + B_{14} A_1 A_2 \bar{A}_3 A_4 + B_{15} A_1 A_2 A_3 \bar{A}_4 + B_{16} A_1 A_2 A_3 A_4 .
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Здесь A_j — сигнал на j -м управляющем входе; B_i — сигнал на i -м информационном входе.

С помощью мультиплексора из 4—1 может быть реализована любая логическая функция трех независимых переменных $F_3(x_1, x_2, x_3)$. Обозначим $x_1 = B, x_2 = A_1, x_3 = A_2$. Тогда $F_3(x_1, x_2, x_3) = F_3(B, A_1, A_2)$. Применим для этой функции формулу разложения по переменным A_1 и A_2 :

$$F_3(B, A_1, A_2) = F_3(B, 0, 0) \bar{A}_1 \bar{A}_2 + F_3(B, 0, 1) \bar{A}_1 A_2 + \\ + F_3(B, 1, 0) A_1 \bar{A}_2 + F_3(B, 1, 1) A_1 A_2. \quad (2.6)$$

Сравнение выражения (2.6) и формулы мультиплексора (2.4) позволяет сделать следующий вывод. Если на информационные входы подать сигналы

$$B_1 = F_3(B, 0, 0);$$

$$B_2 = F_3(B, 0, 1);$$

$$B_3 = F_3(B, 1, 0);$$

$$B_4 = F_3(B, 1, 1),$$

то получим равенство $F_{4-1} = F_3(B, A_1, A_2) = F_3(x_1, x_2, x_3)$.

В результате подстановки соответствующих значений A_1 и A_2 в (2.6) переменные $B_1 - B_4$ могут принимать значения из множества

$$B_i = \{0, 1, B, \bar{B}\} = \{0, 1, x_1, \bar{x}_1\}.$$

Аналогично любая логическая функция четырех переменных $F_4(x_1, x_2, x_3, x_4)$ может быть реализована коммутатором 8—1. Для этого три переменные (например, x_2, x_3, x_4) подаются на управляющие входы, а выходы определяются формулами:

$$B_1 = F_4(B, 0, 0, 0); \quad B_5 = F_4(B, 1, 0, 0);$$

$$B_2 = F_4(B, 0, 0, 1); \quad B_6 = F_4(B, 1, 0, 1);$$

$$B_3 = F_4(B, 0, 1, 0); \quad B_7 = F_4(B, 1, 1, 0);$$

$$B_4 = F_4(B, 0, 1, 1); \quad B_8 = F_4(B, 1, 1, 1).$$

Для реализации произвольной логической функции пяти независимых двоичных переменных $F_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ может быть применен коммутатор 16—1. В этом случае четыре независимых переменных (например, x_2, x_3, x_4, x_5) подаются на управляющие входы, а сигналы на информационных входах определяются по формулам:

$$B_1 = F_5(B, 0, 0, 0, 0); \quad B_9 = F_5(B, 1, 0, 0, 0);$$

$$B_2 = F_5(B, 0, 0, 0, 1); \quad B_{10} = F_5(B, 1, 0, 0, 1);$$

$$B_3 = F_5(B, 0, 0, 1, 0); \quad B_{11} = F_5(B, 1, 0, 1, 0);$$

$$B_4 = F_5(B, 0, 0, 1, 1); \quad B_{12} = F_5(B, 1, 0, 1, 1);$$

$$\begin{aligned}
B_5 &= F_5(B, 0, 1, 0, 0); & B_{13} &= F_5(B, 1, 1, 0, 0); \\
B_6 &= F_5(B, 0, 1, 0, 1); & B_{14} &= F_5(B, 1, 1, 0, 1); \\
B_7 &= F_5(B, 0, 1, 1, 0); & B_{15} &= F_5(B, 1, 1, 1, 0); \\
B_8 &= F_5(B, 0, 1, 1, 1); & B_{16} &= F_5(B, 1, 1, 1, 1).
\end{aligned}
\tag{2.7}$$

Из (2.7) для сигналов, подаваемых на информационные входы, можно получить компактную формулу

$$B_k = F_n(B, N_{k-1}), \tag{2.8}$$

где N_{k-1} — двоичный код числа $k-1$; k — номер информационного входа; n — индекс логической функции, выражающий число независимых переменных. Для $K=4-1$ $n=3$, $K=8-1$ $n=4$, $K=16-1$ $n=5$.

Пример 2.1. Реализовать с помощью коммутатора 8—1 функцию

$$F_4 = x_1 \bar{x}_2 x_3 + \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 + x_2 \bar{x}_3 x_4 + \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4 + x_1 \bar{x}_3 x_4 + x_1 x_2 \bar{x}_4.$$

Составим таблицу истинности заданной функции (табл. 2.2). Выберем в качестве управляющих переменных $x_1 = A_1$, $x_2 = A_2$, $x_3 = A_3$. Тогда $x_4 = B$.

Таблица 2.2

Номер п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	F_4	B_i
1 } 2 }	0	0	0	0 1	0 0	B_1
3 } 4 }	0	0	1	0 1	1 0	B_2
5 } 6 }	0	1	0	0 1	1 1	B_3
7 } 8 }	0	1	1	0 1	0 0	B_4
9 } 10 }	1	0	0	0 1	0 1	B_5
11 } 12 }	1	0	1	0 1	1 1	B_6
13 } 14 }	1	1	0	0 1	1 1	B_7
15 } 16 }	1	1	1	0 1	1 0	B_8

Примечание. B_i — информационный сигнал, который при данном сочетании управляющих сигналов x_1, x_2, x_3 подключается к выходу коммутатора.

Из табл. 2.2 видим:

$$\begin{aligned} B_1 &= F_4(0, 0, 0, B) = 0; & B_5 &= F_4(1, 0, 0, B) = x_4; \\ B_2 &= F_4(0, 0, 1, B) = \bar{x}_4; & B_6 &= F_4(1, 0, 1, B) = 1; \\ B_3 &= F_4(0, 1, 0, B) = 1; & B_7 &= F_4(1, 1, 0, B) = 1; \\ B_4 &= F_4(0, 1, 1, B) = 0; & B_8 &= F_4(1, 1, 1, B) = \bar{x}_4. \end{aligned}$$

Схема, реализующая заданную функцию, приведена на рис. 2.6.

2.2.4. Реализация логических функций на двух коммутаторах

Напишем уравнение (2.5) коммутатора 8-1 в форме

$$\begin{aligned} F_{8-1} &= (B_1 \bar{A}_1 \bar{A}_2 + B_3 \bar{A}_1 A_2 + B_5 A_1 \bar{A}_2 + B_7 A_1 A_2) \bar{A}_3 + \\ &+ (B_2 \bar{A}_1 \bar{A}_2 + B_4 \bar{A}_1 A_2 + B_6 A_1 \bar{A}_2 + B_8 A_1 A_2) A_3. \end{aligned}$$

Выражения в скобках являются уравнениями коммутатора 4-1. Они эквивалентны (2.4), поэтому можно записать

$$F_{8-1} = F'_{4-1} \bar{A}_3 + F''_{4-1} A_3. \quad (2.9)$$

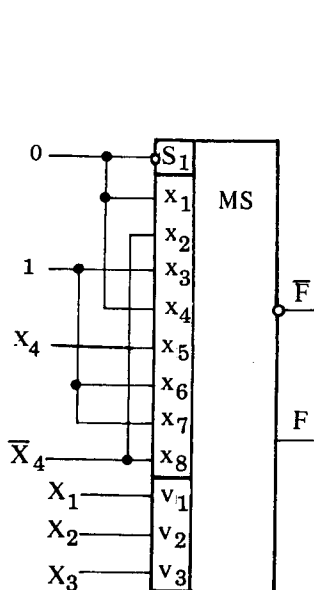


Рис. 2.6. Реализация функции с помощью коммутатора 8-1.

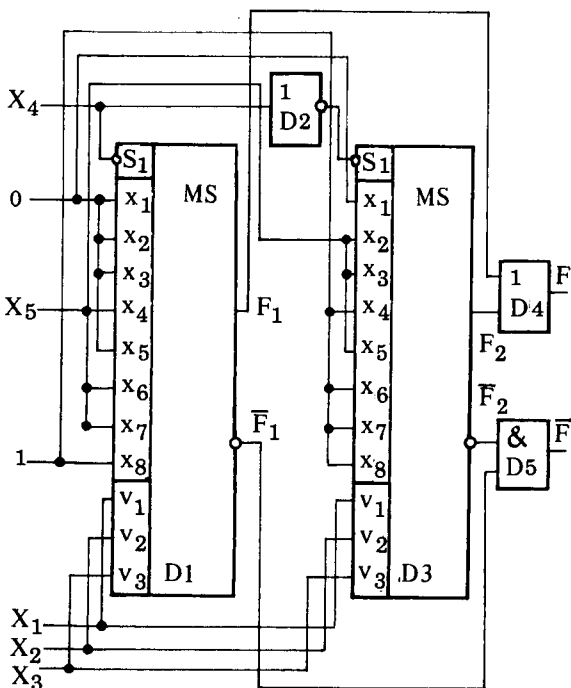


Рис. 2.7. Реализация мажоритарного элемента на пять входов с помощью двух коммутаторов 8-1.

Формула (2.9) показывает, что при наличии стробирующих входов функция четырех переменных F_4 может быть реализована двумя мультиплексорами 4—1. Аналогично могут быть получены формулы

$$F_{16-1} = F'_{8-1} \bar{A}_4 + F''_{8-1} A_4. \quad (2.10)$$

Объединяя два коммутатора 16—1, получаем выражение для произвольной функции шести переменных

$$F_{32-1} = F'_{16-1} \bar{A}_5 + F''_{16-1} A_5. \quad (2.11)$$

На основании (2.9)–(2.11) сформулируем следующее правило.

Для реализации обыкновенных логических функций F_i i переменных ($i = \{4, 5, 6\}$) на двух коммутаторах 1 из n , где соответственно $n = \{4, 8, 16\}$, необходимо: 1) составить таблицу истинности заданной логической функции для всех двоичных наборов аргументов; 2) ($i - 2$) аргумента подать параллельно на управляющие входы обоих коммутаторов; 3) ($i - 1$)-й аргумент подать на стробирующий вход первого коммутатора и через элемент инверсии — на стробирующий вход второго коммутатора; 4) представить заданную функцию в виде $F_i = F'_{i-1} x_c + F''_{i-1} \bar{x}_c$, где x_c — сигнал, поступающий на инверсный стробирующий вход первого коммутатора; $\bar{x}_c$ — сигнал на инверсном стробирующем входе второго коммутатора; 5) на информационные входы первого и второго коммутаторов подать сигналы из множества $\{0, 1, x_i, \bar{x}_i\}$, получаемые по формулам (2.8) соответственно для функций F'_{i-1} и F''_{i-1} ; 6) для получения выходной функции F_i прямые выходы коммутаторов подать на элемент ИЛИ; 7) для образования парафазного выхода $\bar{F}_i$ инверсные выходы обоих коммутаторов подать на вход элемента И.

Пример 2.2. Реализовать на двух коммутаторах 8—1 мажоритарный логический элемент на пять входов:

$$F_5 = x_1 x_2 x_3 + x_1 x_2 x_4 + x_1 x_2 x_5 + x_1 x_3 x_4 + x_1 x_3 x_5 + \\ + x_1 x_4 x_5 + x_2 x_3 x_4 + x_2 x_3 x_5 + x_2 x_4 x_5 + x_3 x_4 x_5. \quad (2.12)$$

Составим таблицу истинности мажоритарной функции (2.12) (табл. 2.3).

Таблица 2.3

$x_4 x_5$	x_1, x_2, x_3							
	000	001	010	011	100	101	110	111
0 0	B'_1 0	B''_1 0	B'_2 0	B''_2 0	B'_3 0	B''_3 0	B'_4 0	B''_4 1
0 1	B'_1 0	B'_1 0	B'_2 0	B'_2 1	B'_3 0	B'_3 1	B'_4 1	B'_4 1
1 0	B'_5 0	B''_5 0	B'_6 0	B''_6 1	B'_7 0	B''_7 1	B'_8 1	B''_8 1
1 1	B'_5 0	B'_5 1	B'_6 1	B'_6 1	B'_7 1	B'_7 1	B'_8 1	B'_8 1

В табл. 2.3 приведены также номера информационных входов B_i' и B_i'' , которые при данном сочетании входных переменных присоединяются соответственно к выходам первого и второго коммутаторов. Схема, реализующая функцию (2.12), показана на рис. 2.7.

2.3. МАТРИЧНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ

Логические функции чаще всего записываются в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ), представляющей собой дизъюнкцию конечного множества элементарных конъюнкций. Например, некоторая функция $y(x_1, x_2, x_3, x_4)$, записанная в ДНФ, может иметь вид $y = x_1 x_2 x_4 \vee x_3 \bar{x}_4$.

Во многих случаях для записи логических функций используется совершенная дизъюнктивная нормальная форма (СДНФ), которая представляет собой дизъюнкцию конечного числа конституентов единицы, т.е. конъюнкций, содержащих прямые или инверсные значения всех переменных, от которых зависит данная функция. Например, $y = x_1 x_2 \bar{x}_3 x_4 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4$.

При рассмотрении системы логических (булевых) функций удобно использовать систему логических уравнений в ДНФ. Например,

$$\begin{aligned} y_1 &= \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \vee x_1 x_3 x_4; \\ y_2 &= \bar{x}_1 x_2 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_3 x_4 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_2 \bar{x}_4; \\ y_3 &= x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \vee x_1 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Любая система логических функций, выраженных в ДНФ, может быть реализована двухуровневой схемой, в которой на первом уровне формируются все термы (конъюнкции), входящие в систему функций, а на втором уровне — заданные функции в виде дизъюнкций соответствующих термов. Так, для реализации системы (2.13) необходимо образовать семь термов $X_1, X_2, \dots, X_7$, из которых на втором уровне формируются три дизъюнкции y_1, y_2, y_3 .

Реализация системы логических функций может быть осуществлена с помощью двух матриц М1 и М2. Матрица М1 (рис. 2.8) имеет L парафазных (прямых и инверсных) входов (по числу независимых логических переменных $x_1, x_2, \dots, x_L$) и h выходов (по числу формируемых термов $X_1, X_2, \dots, X_h$). Входы матрицы М1 образуют систему вертикальных шин, а ее выходами являются горизонтальные шины. Выходы матрицы М1 соединяются с горизонтальными входными шинами матрицы М2. На выходных вертикальных шинах матрицы М2 образуются сигналы $y_1, y_2, \dots, y_N$, соответствующие заданным логическим функциям.

Соединения между вертикальными и горизонтальными шинами матриц М1 и М2 осуществляются полупроводниковыми диодами, биполярными или униполярными транзисторами. На рис. 2.9 приведена схема матричной реализации системы функций (2.13), выполненная на диодах и биполярных транзисторах.

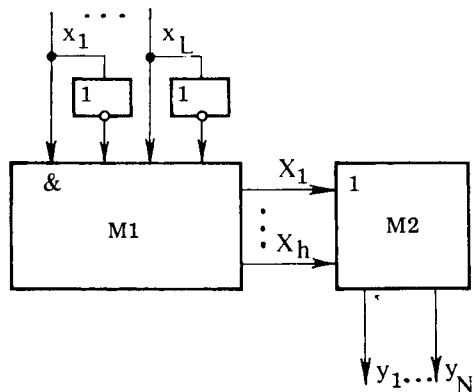


Рис. 2.8. Структура матричной реализации комбинационной схемы.

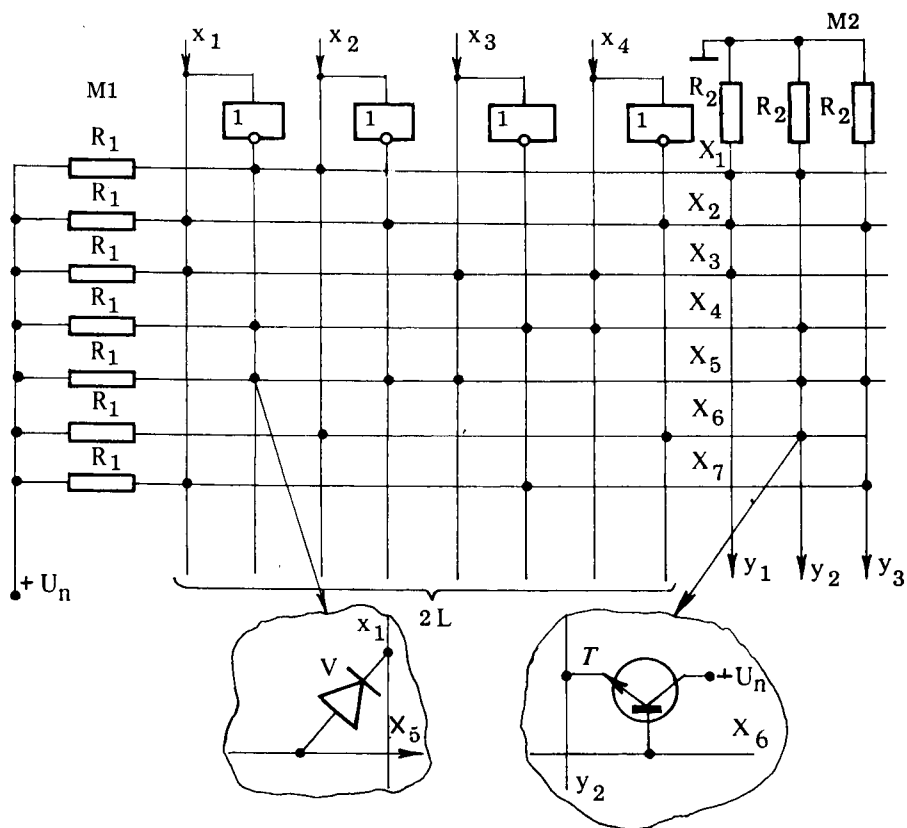


Рис. 2.9. Реализация системы логических функций с помощью диодной матрицы M1 и матрицы M2 на биполярных транзисторах.

На горизонтальной шине X_h , $h = 1, \dots, 7$, появляется сигнал логической единицы (высокого уровня) только при наличии входных сигналов высокого уровня на диодах, аноды которых присоединены к h -й горизонтальной шине, а катоды — к входам, определяющим формируемый терм. Например, при поступлении входных сигналов $\bar{x}_1$ и x_2 диоды, присоединенные к первой горизонтальной шине, оказываются закрытыми, и на выходе матрицы получают сигнал 1. Если хотя бы один из присоединенных к этой шине диодов открыт, то выходной сигнал будет равен 0 (низкий уровень напряжения).

Таким образом, на первой горизонтальной шине формируется терм $X_1 = \bar{x}_1 x_2$. Транзистор открывается при наличии сигнала 1 на горизонтальной шине, соединенной с базой транзистора. При открывании хотя бы одного из транзисторов, соединенных с данной вертикальной шиной, на выходе матрицы M2 появится сигнал 1 (высокий уровень напряжения). Так, для получения $y_1 = 1$ достаточно, чтобы один из термов X_1 , X_2 или X_3 был равен 1.

Двухуровневые (матричные) комбинационные схемы можно описать компактной таблицей с числом столбцов $L + N$ (по числу входов и выходов) и числом строк h (по числу термов) (табл. 2.4). Во второй строчке табл. 2.4 показано, что терм X_2 получает значение 1, если $x_1 = 1, x_2 = 0, x_4 = 0$. При этом на выходе схемы появляются сигналы $y_1 = 1, y_2 = 0, y_3 = 1$. Входной сигнал x_3 на образование терма X_2 не влияет (отмечено знаком +). Аналогично читаются остальные строки табл. 2.4. Кроме того, $y_1 = X_1 + X_2 + X_3$; $y_2 = X_1 + X_4 + X_5 + X_6$; $y_3 = X_2 + X_5 + X_7$.

В некоторых случаях более удобной оказывается реализация булевых функций, выраженных в скобочной форме. Пусть, например,

$$y_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 + \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 + x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 + x_1 x_2 x_3;$$

$$y_2 = \bar{x}_1 x_2 x_3 + x_1 \bar{x}_2 x_3 + x_1 x_2 \bar{x}_3 + x_1 x_2 x_3.$$

Представим эти выражения в "скобочной" форме:

$$y_1 = (x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2) \bar{x}_3 + (x_1 x_2 + \bar{x}_1 \bar{x}_2) x_3;$$

Таблица 2.4

X	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3
X_1	0	1	+	+	1	1	—
X_2	1	0	+	0	1	—	1
X_3	1	+	1	1	1	—	—
X_4	0	+	0	1	—	1	—
X_5	0	0	1	+	—	1	1
X_6	+	1	+	0	—	1	—
X_7	1	+	0	+	—	—	1

$$y_2 = x_1 x_2 + (x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2) x_3.$$

Применение скобочных форм в некоторых случаях существенно уменьшает необходимую площадь матриц.

2.4. МИКРОПРОГРАММНЫЕ АВТОМАТЫ

Микропрограммный автомат (МПА) представляет собой устройство, позволяющее аппаратным путем осуществить ряд (конечное множество) последовательных преобразований дискретной входной информации. МПА удобно рассматривать как композицию управляющего и операционного автоматов (рис. 2.10). Входная информация поступает на вход управляющего автомата A в виде L -компонентного набора двоичных переменных $x_1, x_2, \dots, x_L$. Автомат A имеет конечное множество внутренних состояний $a_1, a_2, \dots, a_M$. При поступлении некоторого набора x_h входных переменных автомат A переходит из состояния a_m в состояние a_s , определяемое функцией перехода автомата. Выходные сигналы $y_1, y_2, \dots, y_N$ автомата A принято называть *микрооперациями*. Выполнению некоторой микрооперации y_h соответствует сигнал, равный логической 1 на h -м выходе автомата A . Множество одновременно выполняемых микроопераций $Y_t = \{y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_n}\}$ называют *микрокомандой*. Значения выходных координат y_i определяются функцией выходов автомата. В частном случае при $n = 1$ $Y_t = \{y_M\}$, т.е. микрокоманда состоит из одной микрооперации y_{t_1} . Если $n = 0$, то множество микроопераций пусто. Такая микрокоманда y_0 означает, что при данном наборе входных переменных МПА, находящийся в состоянии a_m , не производит никаких микроопераций. Микрокоманды формируются операционным автоматом B из поступающих на его вход микроопераций. Множество микрокоманд $Y_R = \{y_1, y_2, \dots, y_R\}$ образует микропрограмму. Управление микропрограммой осуществляется путем подачи на вход МПА команд (инструкций) в определенной последовательности.

МПА отличается от обычного автомата большим числом L входных переменных, из которых каждый раз для перехода из a_m в a_s используется лишь незначительная их часть. Вследствие большой размерности входных переменных описание МПА с помощью обычных таблиц входов и выходов практически невозможно. Для описания (задания) МПА применяют таблицы переходов, в которых каждому переходу соответствует одна строчка таблицы. Общее число строк равно числу необходимых переходов H . В таблице указывается номер перехода (строки) h , состояние a_m автомата, в котором он находится

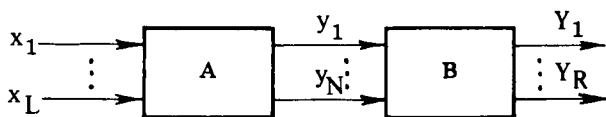


Рис. 2.10. Микропрограммный автомат как композиция управляющего (А) и операционного (В) автоматов.

Таблица 2.5

h	a_m	a_s	x_h	y_t	
1	a_1	a_3	x_1	y_7	y_8
2	—	a_1	x_1	—	y_0
3	a_2	a_3	1	$y_{10}y_{11}$	y_4
4	a_3	a_6	x_7	$y_{10}y_{11}$	y_4
5		a_8	$\bar{x}_7x_8$	—	y_0
6		a_2	$\bar{x}_7\bar{x}_8$	$y_2y_5y_{10}$	y_1

Таблица 2.6

h	a_m	$K(a_m)$	a_s	$K(a_s)$	x_h	y_t	D_h
1	a_1	110	a_3	101	x_1	y_7y_8	D_1D_3
2			a_1	110	$\bar{x}_1$	y_0	D_1D_2
3	a_2	000	a_3	101	1	$y_{10}y_{11}$	D_1D_3
4	a_3	101	a_6	100	x_7	$y_{10}y_{11}y_4$	D_1
5			a_8	001	$\bar{x}_7x_8$	y_0	D_3
6			a_2	000	$\bar{x}_7\bar{x}_8$	$y_2y_5y_{10}y_1$	

до появления входного сигнала, состояние a_s , в которое автомат переходит при появлении входного сигнала, набор входных сигналов x_h , переводящий автомат из состояния a_m в состояние a_s , микрокоманды y_t и соответствующие им микрооперации $\{y_{t_1}, \dots, y_{t_n}\}$. Табл. 2.5 является примером начальной части таблицы переходов некоторого МПА, общее число строк которого может быть значительно больше.

Для синтеза МПА необходимо осуществить кодирование состояний автомата, которое фиксируется элементами памяти. Необходимое количество K элементов памяти определяется формулой

$$R = \lceil \log_2 M \rceil,$$

где M — общее число состояний автомата;

$$] z [= \begin{cases} z, & \text{если } z - \text{целое число;} \\ \text{ближайшему целому числу } > z, & \text{если } z \text{ не целое.} \end{cases}$$

В качестве элементов памяти могут быть использованы различные типы ЗУ. Обычно применяют простейшие ЗУ, ячейками которых являются D-триггеры. Для изменения состояния ячеек ЗУ на их входы подаются сигналы возбуждения памяти $D_1, D_2, \dots, D_R$, под действием которых после срабатывания триггеров устанавливаются соответствующие выходные запоминаемые сигналы $T_1, T_2, \dots, T_R$.

Кодирование состояний и функция возбуждения памяти отражаются в структурной таблице МПА (табл. 2.6). Структурная таблица является расширенной таблицей переходов, в которой добавлены столбцы: кода исходного состояния $K(a_m)$, кода состояния, в которое переходит автомат, $K(a_s)$ и функции возбуждения памяти D_h .

На основании структурной таблицы легко определить функции выходов (микроопераций) y_i и функции возбуждения элементов памяти D_j :

$$y_i = \bigvee_v E y_i; \quad D_j = \bigvee_w E D_j,$$

где $E y_i$ — терм микрооперации y_i ; $E D_j$ — терм функции возбуждения элемента памяти D_j . Дизъюнкция термов $E y_i$ содержит v термов, где v — число строк структурной таблицы, содержащих микрооперацию y_i . Аналогично дизъюнкция термов $E D_j$ распространяется на все w строк структурной таблицы, содержащих сигнал D_j .

Термы $E y_i$ и $E D_j$ представляют собой конъюнкции кода состояния $K(a_m) = A_m$ и набора входных переменных x_h в соответствующих строках таблицы:

$$E y_i = A_{mi} x_{hi}; \quad E D_j = A_{mj} x_{hj}.$$

Например, если предположить, что табл. 2.6 является полной структурной таблицей МПА, то получим:

$$y_2 = y_5 = E_6 = T_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{x}_7 \bar{x}_8;$$

$$y_7 = E_1 = T_2 T_1 \bar{T}_3 x_1;$$

$$y_{10} = E_3 \vee E_4 \vee E_6 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \vee T_1 \bar{T}_2 T_3 x_7 \vee T_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{x}_7 \bar{x}_8;$$

$$y_{11} = E_3 \vee E_4 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \vee T_1 \bar{T}_2 T_3 x_7;$$

$$D_1 = E_1 \vee E_2 \vee E_3 \vee E_4 = T_1 T_2 \bar{T}_3 x_1 \vee T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{x}_1 \vee \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \vee T_1 \bar{T}_2 T_3 x_7;$$

$$D_2 = E_2 = T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{x}_1;$$

$$D_3 = E_1 \vee E_3 \vee E_5 = T_1 T_2 \bar{T}_3 x_1 \vee \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \vee T_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{x}_7 x_8.$$

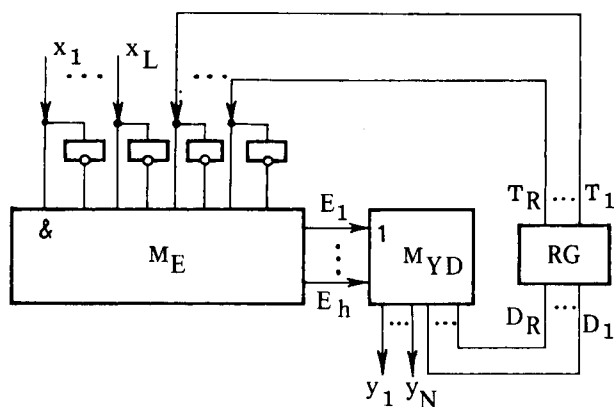


Рис. 2.11. Тривиальная матричная реализация микропрограммированного автомата.

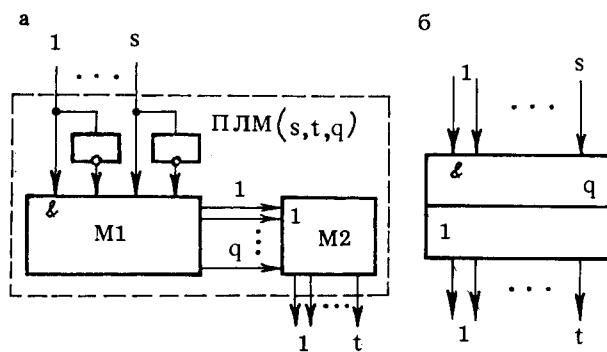


Рис. 2.12. ПЛМ комбинационной логики:
а – структура; б – условное обозначение.

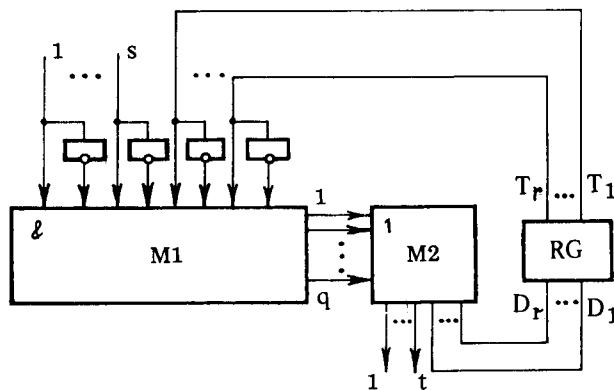


Рис. 2.13. Структура ПЛМ с памятью.

Микропрограммный автомат может быть реализован двумя матрицами (M_E, M_{YD}) и запоминающим устройством RG (рис. 2.11). Матрица M_E формирует необходимые термы $E_1, \dots, E_n$, а матрица M_{YD} образует дизъюнкции этих термов, формируя выходные сигналы (микрооперации) $y_1, \dots, y_N$ и функции возбуждения элементов памяти $D_1, \dots, D_R$. На вход матрицы M_E поступают входные переменные $x_1, \dots, x_L$ и сигналы состояния элементов памяти $T_1, \dots, T_R$.

Реализация МПА по его первоначальной структурной таблице является тривиальной. Недостаток полученной структуры заключается в необходимости применения матриц с большой информационной емкостью, характеризующей общее число элементов матриц. Суммарная информационная емкость матриц МПА (см. рис. 2.11):

$$S = S(M_E) + S(M_{YD}) = 2(L + R)H + (N + R)H$$

или

$$S = (2L + 3R + N)H.$$

Для уменьшения информационной емкости применяются различные методы рационального кодирования состояний и микрокоманд, замены входных переменных, декомпозиции матриц и др.

Реализация МПА возможна на программируемых логических матрицах.

Программируемая логическая матрица (ПЛМ) представляет собой логическую схему для преобразования комбинаций $X = x_1 x_2, \dots, x_n$ входного двоичного кода в соответствующие комбинации $Y = y_1 y_2, \dots, y_m$ выходного двоичного кода. Правило преобразования кодов задается обычно таблицей истинности. По виду внутренней организации различают ПЛМ комбинационной логики и ПЛМ с памятью.

ПЛМ комбинационной логики (рис. 2.12) состоит из двух матриц M_1 , M_2 и элементов инверсии НЕ для организации парафазных входов. В матрице M_1 формируется q термов от s переменных, а в матрице M_2 — t дизъюнкций, составленных из этих термов. Размеры q , s и t указываются в обозначении матрицы, имеющей вид ПЛМ (S, t, q). Например, запись ПЛМ (6, 6, 10) показывает, что матрица имеет 6 входов, 6 выходов и 10 термов.

ПЛМ с памятью (рис. 2.13) содержит те же элементы, что и ПЛМ комбинационной логики, и дополнительно регистр памяти RG, состоящий из r элементов памяти, в качестве которых обычно используются D-триггеры.

Количество элементов памяти выбирается из условия $r \geq \log_2 q$. В обозначении ПЛМ (S, t, q, r) в скобках указываются ее параметры. ПЛМ обоих типов производятся серийно с параметрами: $s \cong t = 12-24$; $q = 48-96$. Для ПЛМ с памятью $r = 6-12$. Выбор способа программирования матрицы в основном определяется ее типом и технологией изготовления. Различают ПЛМ программируемые в процессе изготовления, программируемые пользователем и репрограммируемые.

Программирование в процессе изготовления позволяет получить дешевые ПЛМ. Наиболее распространенным является масочное программирование, состоящее в том, что с помощью маски производится металлизация определен-

ных участков полупроводникового кристалла для подключения выводов элементов к шинам матриц.

Программирование пользователем осуществляется электрическим способом при помощи специального оборудования. Чаще всего процесс программирования состоит в удалении лишних (ненужных для данной программы) соединений элементов с шинами матриц путем пережигания (выплавления) специальных перемычек. При этом через перемычку пропускается электрический ток, значительно превышающий токи, возможные в нормальных эксплуатационных режимах.

В ПЛМ с репрограммированием первоначально внесенная программа может быть анулирована (стерта) и вместо нее внесена новая. Стирание программы осуществляется с помощью рентгеновского или ультрафиолетового облучения, а внесение новой программы — электрическим способом.

Если параметры микропрограммного автомата, заданного структурной таблицей типа табл. 2.6, удовлетворяют условиям:

$$\begin{aligned} L + R &\leq S; \\ N + R &\leq t; \\ H &\leq q, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $R = \lceil \log_2 M \rceil$; M — число возможных состояний МПА, то такой автомат может быть реализован тривиальным образом на одной ПЛМ (S, t, q) комбинационной логики и на одном регистре памяти, содержащем не меньше R элементов. Структура такого МПА показана на рис. 2.14, а. Она отличается от структуры, приведенной на рис. 2.11, только тем, что обе матрицы M_E и M_{YD} объединены в одну ПЛМ комбинационной логики.

МПА может быть тривиальным образом реализован на ПЛМ (S, t, q, r) с памятью, содержащей внутренний регистр памяти с числом элементов $r \geq \lceil \log_2 q \rceil$ [при выполнении условий:]

$$L \leq S; N \leq t; H \leq q. \quad (2.15)$$

Получаемая структура показана на рис. 2.14, б. Она полностью совпадает со структурой ПЛМ (S, t, q, r) .

Если условия (2.14) или (2.15) не выполняются, то возможно построение МПА на двух и более ПЛМ. Наиболее просто это достигается путем расширения по выходам и по термам ПЛМ с комбинационной логикой. Для лучшего использования информационной емкости ПЛМ применяют различные методы декомпозиции автомата и оптимизации его структуры. При расширении по выходам (рис. 2.15, а) матрицы M_1 , соединяемые ПЛМ, должны быть одинаковыми (формировать одинаковые термы). Для получения различных выходов матрицы M_2 формируют различные дизъюнкции термов. При соединении K матриц ПЛМ (S, t, q) получим эквивалентную матрицу ПЛМ (S, Kt, q) .

При расширении по термам (рис. 2.15, б) получим эквивалентную матрицу ПЛМ (S, t, Kq) . В этом случае соединяются одноименные входы и одноименные выходы всех ПЛМ (S, t, q) . В зависимости от типа ПЛМ выходы соединяются непосредственно или через элементы ИЛИ с k входами. В этом случае каждая матрица ПЛМ (S, t, q) формирует различные термы и частичные

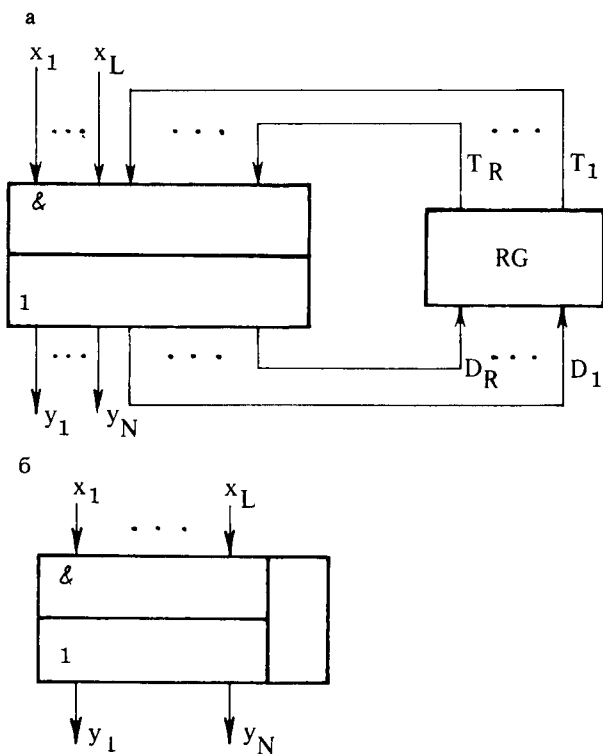


Рис. 2.14. Тривиальная реализация МПА:

а – на ПЛМ (s, t, q) комбинационной логики; *б* – на ПЛМ (s, t, q, z) с памятью.

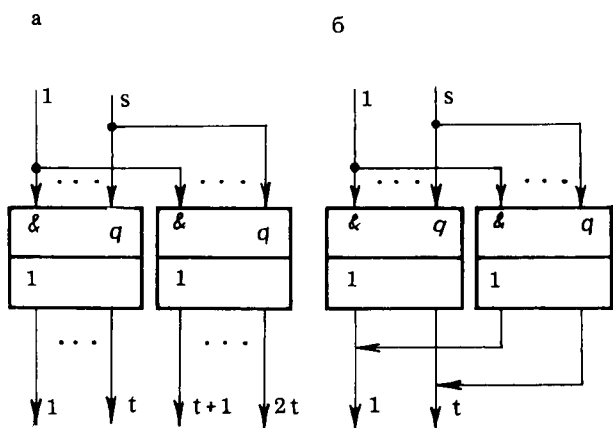


Рис. 2.15. Расширение ПЛМ по выходам (*а*) и по термам (*б*).

дизъюнкции y_{iv} , которые затем объединяются в требуемый выходной сигнал

$$y_i = \sum_{v=1}^k y_{iv}.$$
 Матричная реализация логических функций используется также для организации программируемых контроллеров.

2.5. ПРОГРАММИРУЕМЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ

Наиболее перспективным направлением совершенствования систем ЦПУ является применение гибко программируемых электронных управляющих систем, основанных на использовании УВМ. Характерной чертой УВМ является их способность к работе в реальном масштабе времени, т.е. в темпе, диктуемом потребностями объекта управления. Обычная вычислительная машина (ЭВМ), выполняющая вычислительные операции, не имеет жестких рамок реализации алгоритма вычислительного процесса во времени.

Специализированные УВМ, предназначенные для управления сложными станками, литейными комплексами, машинами для обработки металлов давлением, автоматическими линиями (АЛ), получили название *программируемых контроллеров* (ПК). Понятие "программируемый" отражает возможность ПК воспринимать программу на языке высокого уровня, а понятие "контроллер" – способность выполнять функции управления сложными технологическими процессами. Встречающиеся в настоящее время термины ПК (PC) и ПЛК (PLC) – программируемый логический контроллер – равнозначны.

Разработка ПК стала возможной благодаря развитию релейной бесконтактной автоматики (бесконтактных логических управляющих систем), ЦПУ технологическим оборудованием, систем программирования и элементной базы.

Несмотря на значительную общность ПК и УВМ, первым присущ ряд характерных с точки зрения пользователя свойств, которые заключаются в следующем: 1) как правило, ПК предназначены только для решения логических задач, у них отсутствуют развитые арифметические операции – умножение, сложение, деление (имеется лишь счёт импульсов); 2) упрощенное программирование, основанное на символах и мнемокодах, которое легко усваивается персоналом, не имеющим специальной подготовки; 3) большая помехозащищенность, потенциальная развязка от внешних цепей (с помощью оптронов и ферритовых устройств), расширенный диапазон допустимых условий применения, что дает возможность эксплуатировать ПК в цехах; 4) модульность конструкции: входы, выходы и объем памяти наращиваются с определенным шагом; 5) оснащение вспомогательными устройствами для выполнения дополнительных функций, к которым относятся таймеры для выдержки времени, счетчики импульсов и др.

Проектирование схемы управления установкой на основе жесткой логики производится индивидуально в каждом конкретном случае: выбираются электрические элементы и узлы, разрабатывается конструкторская документация на систему управления, производится ее монтаж, отладка, корректиров-

ка. Изготовление схемы требует наличия определенной номенклатуры комплектующих изделий. Для описанного процесса характерны значительные трудозатраты, что особенно ощутимо при мелкосерийном или индивидуальном производстве. Стоимость ручного труда в последнее время имеет тенденцию к росту, в то время как затраты на оборудование непрерывно снижаются.

ПК обеспечивают изменение логической программы функционирования с помощью встраиваемого или автономного устройства программирования, что равносильно разработке новой принципиальной электрической схемы с жесткими связями. При этом отпадает необходимость в отключении объекта управления для переналадки, исключаются трудоемкие процессы, связанные с проектированием новой схемы.

Кроме функций управления, ПК выполняет также функции регулирования, причем изменение уставок регуляторов может осуществляться как вручную, так и программным путем. ПК обеспечивают также связь с управляющим вычислительным комплексом более высокого уровня иерархии.

Принцип действия ПК состоит в сканировании (последовательном опросе) участков программы, ограниченных одной выходной функцией; получении информации о состоянии задействованных в опрашиваемом участке элементов программы; проведении логических операций, заданных программой; возбуждении или невозбуждении выходной функции в зависимости от полученного результата. Опрос участков программы происходит циклично, один за другим, в порядке размещения их в программе, с возвращением к началу программы после окончания полного цикла опроса (сканирования) в соответствии с алгоритмом функционирования (рис. 2.16). Время, необходимое для одного цикла опроса (время сканирования), зависит от объема программы и элементной базы и для современных ПК составляет обычно 2–3 мс на 1 К слов памяти.

Типичная функциональная схема ПК приведена на рис. 2.17.

Программируемый контроллер состоит из центрального процессора, ПЗУ, блоков входов-выходов (входного и выходного регистров), обеспечивающих сопряжение с входными датчиками и с исполнительными устройствами, и сканирующего устройства, которое производит поочередный опрос входов и выходов. К контроллеру может подключаться программная панель (загрузчик программы), через которую производится набор программы.

В некоторых типах контроллеров в период настройки цикла вместо ПЗУ подключается ОЗУ, которое может осуществлять как считывание, так и за-

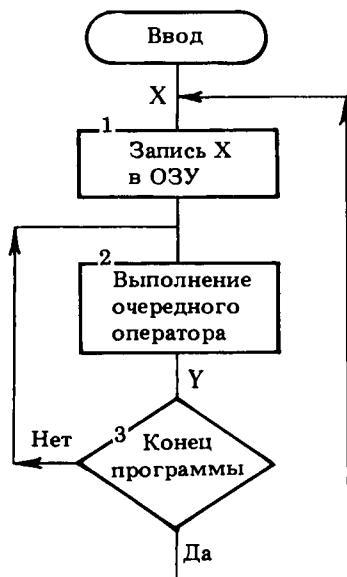


Рис. 2.16. Алгоритм функционирования ПК.

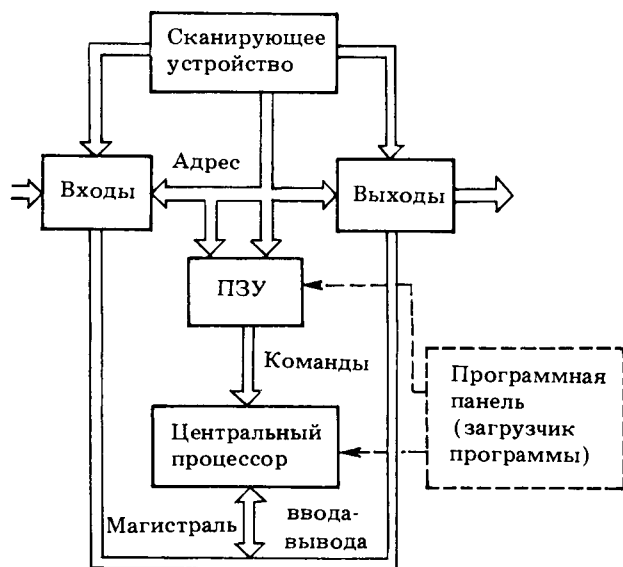


Рис. 2.17. Функциональная схема ПК.

пись (и перезапись) информации. После окончательной отладки цикла и внесения всех изменений программа перезаписывается с ОЗУ на ПЗУ. Часто в контроллерах используются ПЗУ, способные перезаписывать информацию, т.е. перепрограммируемые (полупостоянные) запоминающие устройства (ППЗУ).

Помимо ручного ввода программы, большинство ПК предусматривают возможность ввода и вывода программы с помощью стандартного программноносителя. Наиболее удобным, особенно в цеховых условиях, является носитель на магнитной ленте.

Система команд ПК представляет собой набор инструкций, обеспечивающих оперативный ввод, контроль и редактирование рабочей программы управления объектом. По своему назначению команды ввода инструкций можно разделить на программные, функциональные, оперативные.

Программные инструкции записываются в рабочую программу ПК, определяют последовательность действий и состоят из кода операции ("что") и адреса операнда ("с чем"). Некоторые программные инструкции являются безадресными, т.е. состоят только из кода операции и выполняются в последовательности, определенной записью программы. Объем рабочей памяти, занимаемый одной программной инструкцией, зависит от структуры ПК. Функциональные инструкции служат для пуска и выбора режима программирующего устройства и ввода, редактирования и контроля рабочей программы. Оперативные команды имеют своей целью активное вмешательство в работу процессора, возбуждение реальных входов и выходов и т.д.

Инструкции вводятся посредством клавиатуры программной панели и делятся на шифрованные и кодированные. Шифрованные инструкции вводятся с помощью одной клавиши, имеющей мнемоническое обозначение (шифр) в соответствующей инструкции. Кодированные инструкции вводятся с по-

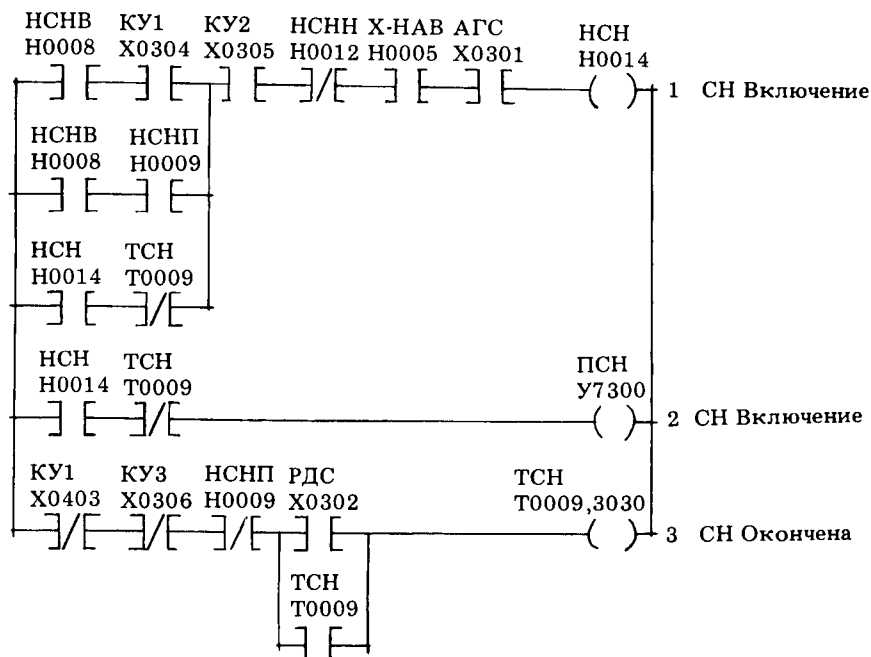


Рис. 2.18. Схема управления на ПК1024 (СН — смазка направляющих).

мощью нескольких клавиш, нажимаемых в заданной последовательности, образующей код инструкции.

В большинстве современных ПК предусмотрено три способа задания программы: 1) в релейных символах; 2) при помощи логических (булевых) выражений; 3) на языке символического кодирования.

При задании программы в релейных символах должна быть подготовлена по определенным правилам условная релейно-контактная схема. Например, для ПК1024 основным правилом является то, что в каждой цепи включения катушки реле-накопителя не должно быть больше 9 контактов, включенных последовательно, и 5 строк контактов, включенных параллельно.

Для контроллеров фирмы Allen Bradley основным правилом является то, что в каждой цепи включения катушки не должно быть больше 13 контактов, включенных последовательно, и 7 строк контактов, включенных параллельно. Для указанных ПК, если контактов в цепи больше, вводятся промежуточные накопители.

Алгоритм управления автоматической линией (программа пользователя) изображается в виде условной релейно-контактной схемы управления. При этом используются символы, принятые в системе программирования ПК, благодаря чему схема может быть использована в качестве задания для программирования. Пример схемы управления на ПК1024 представлен на рис. 2.18. Каждый символ схемы, соответствующий входному или выходному аппарату, снабжается индексом этого аппарата. Символы, соответствующие промежуточным логическим аппаратам (накопителям или маркерам), реле времени

Таблица 2.7

Модель, фирма, страна	Запоминающее устройство			Время цикла, мс/1К	Входы		Выходы			Количество таймеров, шт.; время			Количество во счетчиков, шт.; число импульсов
	тип	объем	мин. макс.		количество, шт.	U _{вх} , В	количество, шт.	U _{вых} , В	I _{вых} , А	мин. макс.			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ПК1024, СССР	RAM	4 К	12 К	5	16	1024	= 24 ~110	16	1024	= 24 ~110	0,5 2,0	256; 0-999 с	256; 0-999
NS-905, TESLA, ЧССР	RAM	1 К	7 К	10	16	512	= 24,48 ~110,220	16	512	= 24,48 ~110,220	0,5 2,0	128; 0-999 с	64; 0-999
PC603, VEM, ГДР	RAM	1 К	8 К	10	8	480	= (12-26,4) ~(94-112)	8	480	= (5-30) = (20,4-30) ~(110-150) = 24 2,5	0,3 2,2 0,5 2,5	32; 0,1-100 мин	-
PLC2/30, ALLEN-BRADLEY, США	RAM	-	8 К	2,5	8	896	= 12,24 = 48 ~110	8	896	= 24 ~110 = 24	1,5 2,5	128; 0-999 с	128; 0-999
Simatik S5: 150A/К, Siemens, ФРГ	RAM	4 К	24 К	5	32	1024	= 24 = 48 ~110 ~220	8	1024	= 24 = 48 ~110,220	0,12 0,5 2,0	128; 0,01-9990 с	128; 0-999
FPC606, FESTO, Австрия	RAM	1 К	16 К	5	8	512	= (20-50)	8	512	= (20-50) = (20-50)	1,0 2,0	256; 0,1 с-16,6 ч	64

PC-600, BOSCH, ФРГ	RAM	16 К	64 К	4	16	2048	=24 ~115 ~220	8	2048	=24 ~110 ~220	0,2 2,0 2,0	256	256
TOYOPUC-L, TOYODA, Япония	RAM	-	8 К	4,5	16	1024	=24 ~110	8	1024	~110 =24	2,0 2,0	(0,1-25,5) с	1-255
IRC-620-30, США	RAM	2 К	24 К	3,3	6	2048	~110 ~220 =5 =(12-24)	6	2048	~110 ~230 =5 =12 =24			

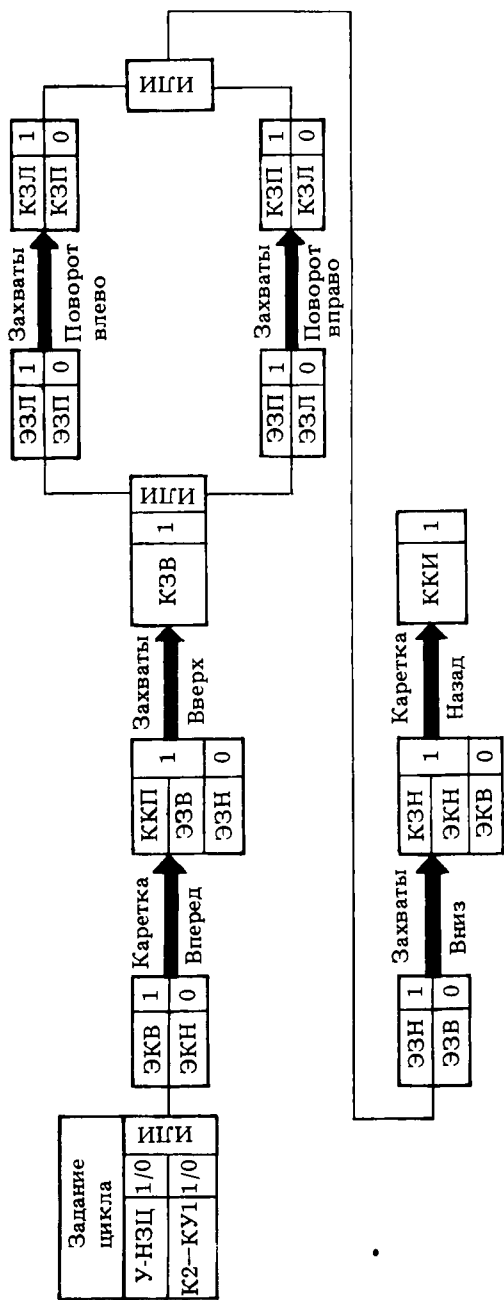


Рис. 2.19. Циклограмма работы кантователя.

(таймерам) и счетчиком, также снабжаются индексами, принятыми в схемах релейной системы управления. Все символы схемы снабжаются адресами соответствующих операторов памяти ПК.

Для ПК1024 первый знак адреса определяет: X – вход, Y – выход, H – накопитель, T – таймер; второй знак – номер блока (шасси); третий – номер модуля (позиции расположения модуля); четвертый и пятый – номера канала (место подключения). Следовательно, адрес X0304 означает: X – вход, 0 – номер блока, 3 – номер модуля, 04 – номер канала.

Для ПК PLC первая цифра адреса означает: 0 – выход или накопитель, 1 – вход, 2 – таймер. Следовательно, адрес 10211 означает: 1 – вход, 0 – номер блока, 2 – номер модуля, 11 – номер канала.

В связи с различием внутримашинной нумерации операторов, соответствующей адресам ПК, и индексов аппаратов составляется систематизированная таблица соответствия адресов операторов и индексов аппаратов. Эта таблица одновременно служит картой распределения памяти ПК.

При проектировании станков, автоматических линий весьма существенно иметь возможность определять нужные системы управления в начальной стадии проектирования. Поэтому для системы, состоящей из модулей, достаточно знать: количество входов, конечных выключателей, кнопок управления, переключателей, реле давления и выходов – магнитных пускателей, электромагнитных муфт, сигнальных ламп, а также основные требования к логике для выбора ПК.

При ориентировочном определении требуемого объема памяти для простых схем (алгоритмов) необходимо 10–15 слов на один вход-выход, для более сложных схем с применением алгебры – 15–20 слов на один вход-выход.

Характеристики некоторых ПК приведены в табл. 2.7.

Рассмотрим пример применения ПК PLC для управления кантователем. Кантователь – один из узлов автоматической линии (АЛ), предназначенный для кантования (поворота на 180°) заготовок в процессе многопозиционной механической обработки. Циклограмма работы кантователя изображена на рис. 2.19. Цикл работы кантователя следующий: исходное положение каретки кантователя – подвод–захват заготовки – подъем – поворот (кантование) – опускание – отвод в исходное положение. Управление кантователем в автоматическом режиме осуществляется узлом центрального управления АЛ (накопитель задания цикла У-НЗЦ), а в полуавтоматическом режиме – нажатием кнопки на наладочном пульте кантователя К2-КУ1 (К2 – индекс кантователя). Привод кантователя гидравлический. Управление золотниками гидросистемы производится электромагнитами. На рис. 2.19 ЭКВ, ЭКН, ЭЗВ, ЭЗН, ЭЗЛ, ЭЗП – электромагниты (Э) каретки (К) при движении "вперед" (В), "назад" (Н), захвата (З) при движении "вверх" (В), "вниз" (Н), поворота при движении "влево" (Л), "вправо" (П); ККП, ККИ – выключатели каретки в конечном и исходном положении.

Каждому входному и выходному аппарату, накопителю присваивается номер (адрес) ввода-вывода, а также адрес накопителей, таймеров, счетчиков (если такие имеются).

Приведем адреса входных и выходных аппаратов и накопителей кантователя, участвующих в движении "каретка вперед и захваты вверх":

Выводы

06410	ЭКВ	КАРЕТКА ВПЕРЕД
06411	ЭКН	КАРЕТКА НАЗАД
06412	ЭЗВ	ЗАХВАТЫ ВВЕРХ
06413	ЭЗН	ЗАХВАТЫ ВНИЗ
06414	ЭЗЛ	ЗАХВАТЫ ВЛЕВО
06415	ЭЗП	ЗАХВАТЫ ВПРАВО

Входы

10706	ПН	НАЛАДКА
10707	КУ1	ЦИКЛ
10710	КУ2	КАРЕТКА ВПЕРЕД
10711	КУ3	ЗАХВАТЫ ВВЕРХ
11000	ККП	КАРЕТКА В ПЕРЕДНЕМ (У ЛИНИИ)
11001	ККИ	КАРЕТКА В ИСХОДНОМ
11002	КЗВ	ЗАХВАТЫ ВВЕРХУ
11003	КЗН	ЗАХВАТЫ ВНИЗУ
11004	КЗЛ	ЗАХВАТЫ В ЛЕВОМ ПОЛОЖЕНИИ
11005	КЗП	ЗАХВАТЫ В ПРАВОМ ПОЛОЖЕНИИ

Накопители

00704 НРА РАЗРЕШЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ
00705 НЗКП ЗАХВАТЫ В КРАЙНЕМ ПОЛОЖЕНИИ
00710 НЦ ЦИКЛ

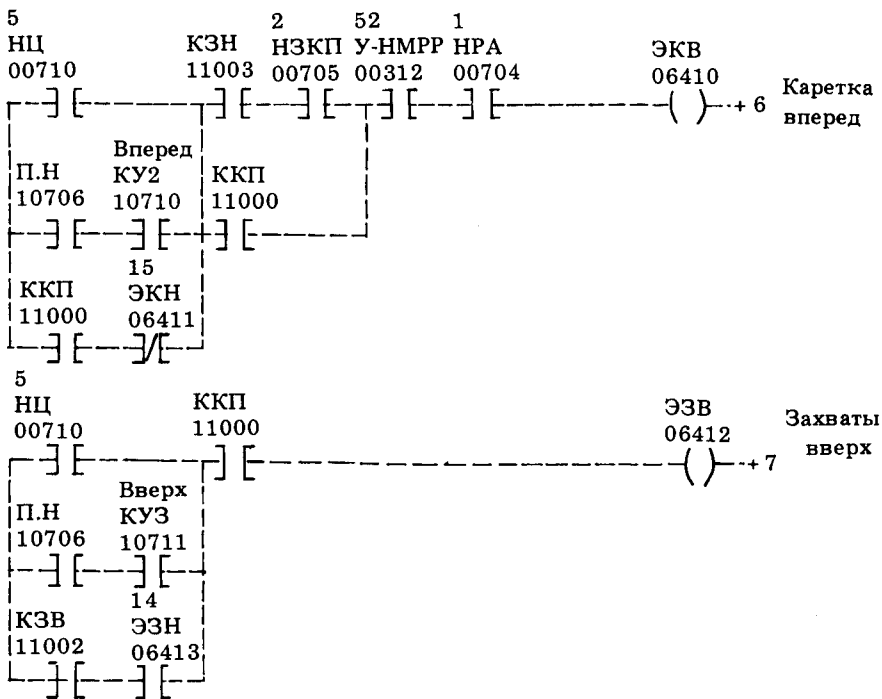


Рис. 2.20. Принципиальная схема управления кантователем в обозначениях ПК.

Прежде чем приступить к программированию, необходимо назначить "номер" (адрес) ввода-вывода для каждого входного и выходного сигналов, а также адрес накопителей, таймеров, счетчиков (если такие имеются). Для контроллеров PLC "номер" адреса ввода-вывода определяется пятизначным числом.

Фрагмент принципиальной схемы управления кантователем, реализующим указанное движение в обозначениях ПК, приведен на рис. 2.20.

При программировании по принципиальной схеме оператор вводит программу последовательно по цепям схемы с помощью клавиатуры переносной программной панели, которая подключается к контроллеру. Для каждого контакта или накопителя оператор набирает номера входа, выхода, накопителя, после чего нажимает на клавиатуре программной панели клавишу с нужным символом.

После набора программы с помощью клавиатуры программатора программа запоминается в ПЗУ контроллера, и контроллер начинает выполнять функции управления, предусмотренные принципиальной схемой согласно циклограмме работы кантователя.

2.6. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ

Для работы в составе РТК разработана серия пультов циклового управления (ПЦУ) типа "Гранит". Замкнутый циклический процесс можно представить в виде петли (окружности) (рис. 2.21), где $1, 2, \dots, n$ — исполнительные механизмы, снабженные датчиками. Последовательно опрашивая датчики, ПЦУ управляет работой абонентов $2, 3, \dots, n$. После окончания работы с абонентом n ПЦУ переходит к обслуживанию абонента 1 , организуя таким образом замкнутый цикл. Реальные технологические процессы отличаются более сложными циклами. Так, технологический процесс литья под давлением можно представить в виде многопетлевой системы (рис. 2.22). Отдельные элементарные петли процесса синхронизируются точками $1, \dots, 8$ и программируются отдельно. ПЦУ позволяет запрограммировать до 16 отдельных подпрограмм пользователя; общее число строк программы 999. ПЦУ построен по модульному принципу, который дает возможность изменять конфигурацию в зависимости от конкретных потребностей, обеспечивает гибкость структуры и высокую ремонтпригодность. Функциональная схема ПЦУ представлена на рис. 2.23. В нее включены: панель управления (ПнУ); пульт математического обеспечения (ПМО); пульт программирования (ППр); пульт управления выносной (ПУВ); пульт контроля и индикации (ПКИ). Указанные устройства связаны общей магистралью пультовой аппаратуры и панели управления.

В состав логического блока ПЦУ входит модуль адаптера МАд1, модуль тестового контроля (МТК), модуль процессора (МПр), модули памяти ППЗУ и ПЗУ и модуль питания (МПит1). Блок ввода-вывода состоит из модуля адаптера МАд2, модулей ввода МВв, модулей вывода МВыв, модуля питания МПит2. Для получения питающих напряжений всех параметров и распределения их по узлам ПЦУ служат модули питания (МПит1, МПит2). Через шину управления системой электропитания осуществляется управление модулем электропитания (МЭП). Блок фильтрации и развязки управляет работой, включением-отключением системы электропитания ПЦУ, блоками вентилято-

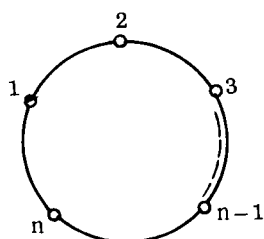


Рис. 2.21. Замкнутый циклический процесс.



Рис. 2.22. Многопетлевая цикловая система.

ров (БВ1 и БВ2), обеспечивает фильтрацию входного напряжения. ПЦУ задает работу технологического оборудования в следующих режимах: 1) автоматическом; 2) полуавтоматическом; 3) пошаговом; 4) ручном; 5) временного останова.

ПЦУ выполнен на основе микропроцессора К580ИК80А и имеет 128/64 каналов ввода-вывода для связи с объектом, ПЗУ объемом 4 К, ППЗУ с энергонезависимым хранением информации (до 100 ч после отключения питания).

Таблица 2.8

Исполнение	Параметры сигналов					
	Входных			Выходных		
	Род тока	Ток, А	Напряжение, В	Род тока	Ток, А	Напряжение, В
Гранит 02-01	Постоянный или переменный	0,02	24	Переменный	2	36–110
Гранит 02-02	То же	0,05	24	”	2	36–110
Гранит 02-03	”	0,02	24	Постоянный	2	12–48
Гранит 02-04	Переменный	0,05	24	”	2	12–48

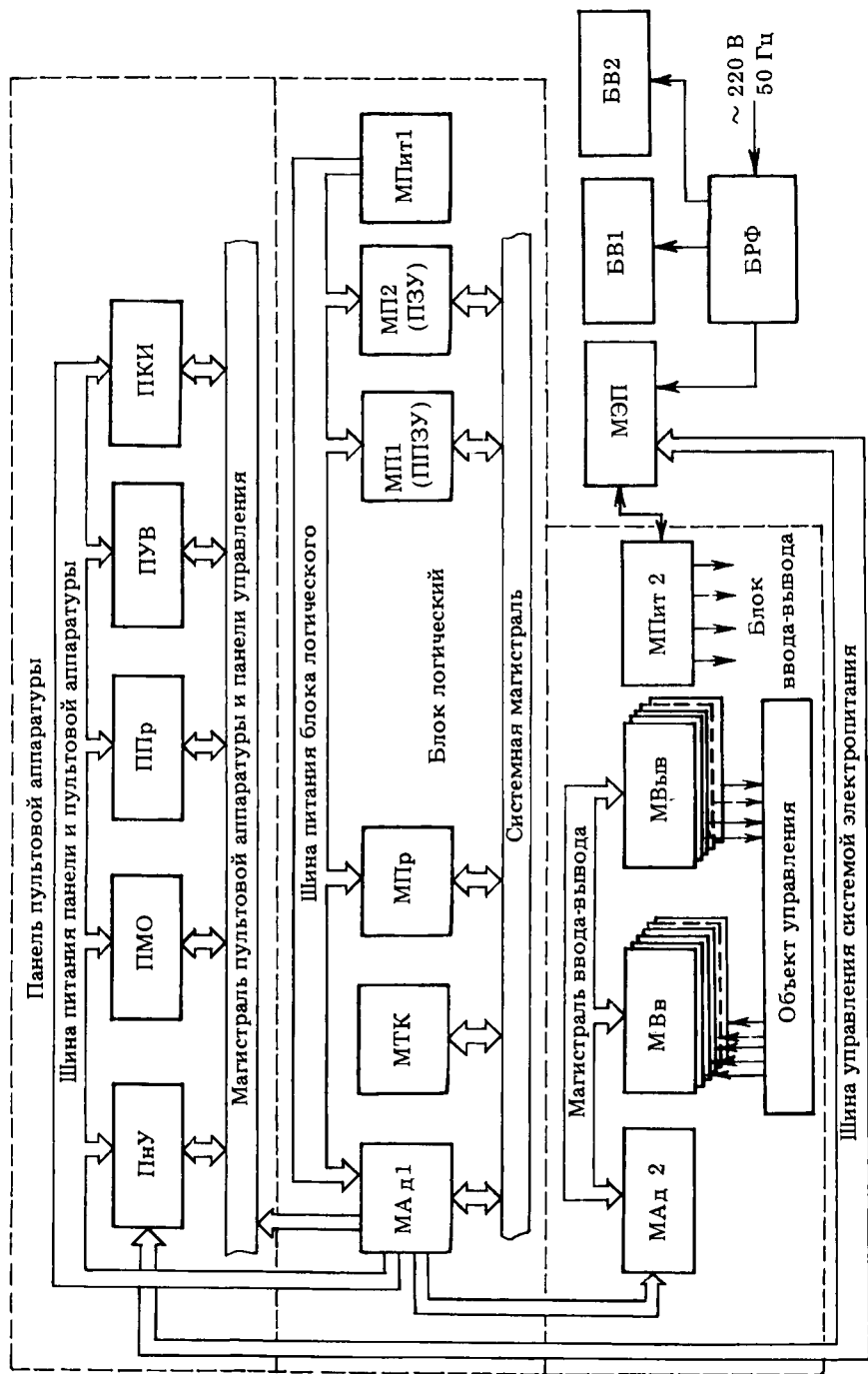
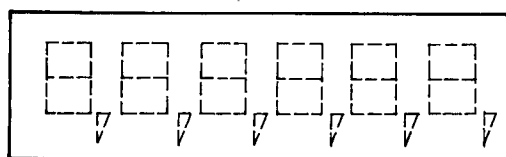


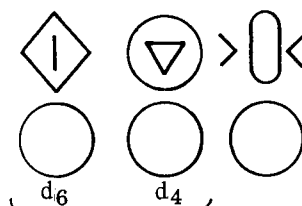
Рис. 2.23. Функциональная схема пульта циклового управления.

Название кнопки	Изображение кнопки	Режим работы
РЕЖИМ		Ручной
		Пошаговый
		Полуавтоматический
		Автоматический
УПРАВЛЕНИЕ		Кнопка "начало цикла" в автоматическом и полуавтоматическом режимах и задание пошагового режима Временный останов работы; для продолжения работы нажимается кнопка "начало цикла" Установка ПЦУ в исходное состояние
		
		

Контроль



FF98 FF99 FF9A FF9B FF9C FF9D



FF9E

Режим

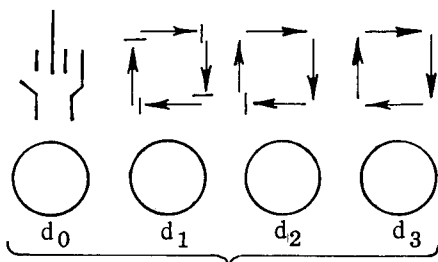


Рис. 2.24. Адресация панели управления.

Программа пользователя объемом 2 К вводится с помощью клавиатуры пульта программирования (ППр). Программируемые таймеры обеспечивают выдержку времени от 1 до 255 с с дискретностью 1 с. Такое же количество таймеров дает выдержку времени от 0,1 до 25,5 с с дискретностью 0,1 с. В ПЦУ имеется 16 программируемых счетчиков с максимальным коэффициентом пересчета, равным 255. Параметры сигналов входа-выхода в зависимости от модификаций ПЦУ приведены в табл. 2.8.

Управление режимами работы производится с помощью ПнУ, где осуществляется визуальный контроль работы ПЦУ.

Задание режимов работы технологического оборудования осуществляется с помощью кнопок РЕЖИМ и УПРАВЛЕНИЕ (табл. 2.9).

Адресация панели управления изображена на рис. 2.24. Описанный пульт может найти применение для широкого класса объектов с цикловыми системами управления.

3. КОДИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ И ЦИФРОВЫЕ КОДЫ

3.1. КОДИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ

Решение вопросов кодирования информации в СПУ является одним из наиболее важных этапов в процессе проектирования системы управления. Выбор кода для представления программы и организация кадра в значительной мере определяют структуру СПУ.

Кодом называется система знаков, однозначно определяющая кодируемую информацию. В качестве кодовых знаков могут использоваться цифры выбранной системы счисления.

Приведем основные способы кодирования информации. *Ручное* задание программы (*ручное кодирование*) с помощью различных переключателей (см. гл. 2) применяется для цикловых СПУ, в некоторых случаях — для позиционных систем. Наибольшее распространение получили *буквенно-цифровые коды* (БЦК). В последнее время развивается кодирование с помощью различных *мнемокодов*. Общение системы ПУ с оператором в значительной мере упростится при речевом способе кодирования информации, когда распоряжения системе подаются голосом с использованием определенного словарного запаса. Вся информация в СПУ представляется набором нулей и единиц независимо от того, как она интерпретируется.

Системой счисления называется совокупность наименований, правил и знаков для записи любого числа. Знаки системы счисления называются цифрами. Системы счисления бывают *позиционными* и *непозиционными*. В технике получили распространение позиционные системы счисления, в которых число цифр ограничено и значение числа, выражаемого каждой цифрой, по определенному закону зависит от места (позиции), которое эта цифра занимает в записи всего числа. Позиция, занимаемая цифрой в записи числа, называется *разрядом*. Нумерация разрядов производится с младшего разряда целой части числа, стоящего непосредственно перед запятой (или точкой, которая общепринята вместо запятой в вычислительной технике и системах ЧПУ), номер которого принимается за нуль.

Цифры могут быть значащими или нулем. Наибольшим по абсолютной величине номером разряда, содержащего значащую цифру, определяется порядок числа (дробной части). Порядок целой части числа считается положительным, а дробной — отрицательным.

Число, выражаемое одной из цифр в позиционной системе счисления, определяется по формуле

$$N_i = x_i a^i, \quad (3.1)$$

где i — номер разряда; x_i — цифра, стоящая в i -м разряде; a — основание системы счисления.

Полное число, для записи которого используется несколько цифр (3.1), расположенных в определенном порядке, равно

$$N = \sum_{i=-q}^{i=p} N_i = \sum_{i=-q}^{i=p} x_i a^i = x_p a^p + x_{p-1} a^{p-1} + \dots + x_0 a^0 + \\ + x_{-1} a^{-1} + x_{-2} a^{-2} + \dots + x_{-q} a^{-q}, \quad (3.2)$$

где p — порядок числа; q — наибольший по абсолютному значению порядок дробной части числа.

Позиционные системы счисления отличаются друг от друга величиной основания a , в качестве которого может быть выбрано любое целое число, кроме единицы. Применяются системы счисления с основанием 16, 10, 8, 4, 3, 2 (шестнадцатеричная, десятичная, восьмеричная, четверичная, троичная, двоичная). Количество цифр в позиционной системе счисления равно ее основанию. Кроме того, основание системы равно наименьшему возможному в ней числу первого порядка. Старшая цифра данной системы счисления на единицу меньше ее основания:

$$x_{\max} = a - 1. \quad (3.3)$$

Определим, применяя (3.2) и (3.3), максимальное целое число p -го порядка в позиционной системе счисления:

$$N_{p \max} = x_{\max} (a^p + a^{p-1} + \dots + 1) = (a - 1) \frac{a^{p+1} - 1}{a - 1} = a^{p+1} - 1.$$

Запись некоторых целых чисел в различных системах счисления приведена в табл. 3.1.

Двоичная система счисления имеет основание $a = 2$ и только две цифры 0 и 1. С ее помощью наиболее просто осуществляется представление чисел. Действительно, применяя для записи числа всего лишь два символа, любые числа можно представлять с помощью дискретных элементов (с двумя устойчивыми состояниями). Для цифры 1 можно поставить в соответствие, например, замкнутое состояние контакта, высокий уровень напряжения логического элемента, наличие отверстия (пробивки) на перфоленте или перфокарте и т.д., а для цифры 0 — противоположные состояния.

Рассмотрим двоичное число 11101.11₍₂₎ (в дальнейшем основание системы счисления будем указывать десятичным индексом), для которого $p = 4$, $q = 2$. По формуле (3.2) найдем выражение этого числа в десятичной системе счисления: $N = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} = 29,75$ ₍₁₀₎.

Восьмеричная и шестнадцатеричная системы счисления получили большое распространение в автоматике и вычислительной технике. Например, их удобно применять при записи программы и констант в машинном коде ЭВМ.

В восьмеричной системе счисления ($a = 8$) используются цифры 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Представим в десятичной системе счисления число 1562.73₍₈₎, используя (3.2):

$$1562.73_{(8)} = 1 \cdot 8^3 + 5 \cdot 8^2 + 6 \cdot 8^1 + 2 \cdot 8^0 + 7 \cdot 8^{-1} + 3 \cdot 8^{-2} = \\ = 882.921875_{(10)}.$$

При переводе дробной части числа из одной системы счисления в другую часто имеет место бесконечная последовательность цифр. Поэтому в получае-

Таблица 3.1

Система счисления			
Десятичная	Двоичная	Восьмеричная	Шестнадцатеричная
0	0	0	0
1	1	1	1
2	10	2	2
3	11	3	3
4	100	4	4
5	101	5	5
6	110	6	6
7	111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
16	10000	20	10
17	10001	21	11
18	10010	22	12
19	10011	23	13
20	10100	24	14
21	10101	25	15
22	10110	26	16
23	10111	27	17
24	11000	30	18
25	11001	31	19
26	11010	32	1A
27	11011	33	1B
28	11100	34	1C
29	11101	35	1D
30	11110	36	1E
31	11111	37	1F
32	100000	40	20
64	1000000	80	40
128	10000000	160	80

мом числе заранее оговаривают число разрядов дробной части числа (в примере $q = -6$).

В шестнадцатеричной системе счисления для обозначения цифр используются шестнадцать различных символов. Для обозначения первых десяти применяют символы десятичной системы счисления, для обозначения шести остальных — заглавные буквы латинского алфавита A, B, C, D, E, F (см. табл. 3.1). В дальнейшем для сокращения будем применять запись "а-ричное число", где a — основание системы счисления (например, шестнадцатеричное число, восьмеричное число и т.д.).

Запишем шестнадцатеричное число и его эквивалент в десятичной системе счисления:

$$\begin{aligned} F5D.4_{(16)} &= F \cdot 16^2 + 5 \cdot 16^1 + D \cdot 16^0 + 4 \cdot 16^{-1} = 15 \cdot 16^2 + \\ &+ 5 \cdot 16 + 13 \cdot 16 + 4 \cdot 16^{-1} = 3933.25_{(10)}. \end{aligned}$$

Основными требованиями, которым должны удовлетворять системы счисления, являются экономичность, надежность и наглядность.

Экономичность системы счисления оценивается количеством знаков, необходимых для передачи сообщений. Объем записи для передачи сообщения N (количество знаков) зависит от основания a системы счисления и максимально возможного числа сообщений M , т.е.

$$M = a^n, \quad (3.4)$$

где n — число разрядов. Число знаков системы счисления $N = an = a (\ln M / \ln a)$. Найдем минимальное значение N с учетом (3.4):

$$\frac{dN}{da} = \ln M / \ln a - \ln M / (\ln a)^2 = 0. \quad (3.5)$$

Решение (3.5) дает

$$\ln a = 1 \text{ или } a = e = 2,718 \dots \quad (3.6)$$

Полученное оптимальное основание системы счисления (3.6) не является целым числом, и его реализация практически невозможна. Ближайшим целым числом будет $a = 3$, однако техническая реализация такой системы счисления представляется достаточно сложной. Поэтому на практике большое распространение получила система счисления с основанием $a = 2$.

При *переводe чисел* из одной системы счисления в другую ограничимся рассмотрением правил перевода восьмеричных и шестнадцатеричных чисел в двоичные и наоборот. Для взаимного преобразования двоичной системы счисления, с одной стороны, и систем, где основанием является степень двойки, с другой, существуют простые методы. Заметим, что $8 = 2^3$ и $16 = 2^4$.

Рассмотрим двоичное число

$$N_{(2)} = \dots d_8 d_7 d_6 d_5 d_4 d_3 d_2 d_1 d_0 d_{-1} d_{-2} d_{-3}, \dots,$$

десятичный эквивалент которого

$$\begin{aligned} N_{(10)} &= \dots d_8 2^8 + d_7 2^7 + d_6 2^6 + d_5 2^5 + d_4 2^4 + d_3 2^3 + d_2 2^2 + \\ &+ d_1 2^1 + d_0 2^0 + d_{-1} 2^{-1} + d_{-2} 2^{-2} + d_{-3} 2^{-3} + \dots \end{aligned} \quad (3.7)$$

Сгруппировав члены в (3.7), получим

$$\begin{aligned}
 N_{(10)} = & \dots (d_8 2^2 + d_7 2^1 + d_6 2^0) 2^6 + (d_5 2^2 + d_4 2^1 + \\
 & + d_3 2^0) 2^3 + (d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0) 2^0 + (d_{-1} 2^2 + d_{-2} 2^1 + \\
 & + d_{-3} 2^0) 2^{-3} + \dots = \dots (d_8 2^2 + d_7 2^1 + d_6 2^0) 8^2 + (d_5 2^2 + \\
 & + d_4 2^1 + d_3 2^0) 8^1 + (d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0) 8^0 + (d_{-1} 2^2 + \\
 & + d_{-2} 2^1 + d_{-3} 2^0) 8^{-1} + \dots
 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Выражение (3.8) содержит степени числа 8 и совпадает с изображением восьмеричного числа. Внутри скобок содержатся двоичные изображения десятичных цифр от 0 до 7. Перевод из двоичной системы в восьмеричную систему будет завершен, если выражение, заключенное в каждой скобке, записать в виде восьмеричной цифры, которая в названном диапазоне совпадает с эквивалентной десятичной цифрой.

Таким образом, правило перевода двоичного числа в восьмеричную форму формулируется так: двоичные цифры объединяем в группы по 3 бита (разряда) — триады, направляя их влево и вправо от разделительной точки. Если количество цифр не кратно 3, добавляются нули. Затем каждая триада заменяется эквивалентной восьмеричной цифрой. Результат будет восьмеричным изображением двоичного числа. Например, возьмем двоичное число $N_{(2)} = 10101110.10001$, биты которого группируются следующим образом: 010 101 110. 100 010. Замена каждой триады восьмеричной цифрой дает $N_{(8)} = 256.42$.

Подобным же образом формулируется правило перевода двоичного числа в шестнадцатеричное, при этом исходное двоичное число группируется по 4 бита. Например,

$$\begin{aligned}
 N_{(2)} &= 1010111011011.10101 = 0001 \ 0101 \ 1101 \ 1011. \ 1010 \ 1000 ; \\
 N_{(16)} &= 15 \text{DB} . \text{A8} .
 \end{aligned}$$

Обратная процедура заключается в записи восьмеричной цифры (или шестнадцатеричной) двоичным изображением из трех и четырех разрядов соответственно.

Таким образом, восьмеричное представление двоичного числа позволяет существенно сократить длину записи числа. Диапазон значений восьмиразрядных двоичных чисел, широко используемых в микропроцессорах и в системах ЧПУ на базе ЭВМ, находится в пределах $00000000_{(2)} - 11111111_{(2)}$ или $000_{(8)} - 377_{(8)}$. Дальнейшее сокращение формы записи можно получить, применяя шестнадцатеричную систему.

Следует отметить, что шестнадцатеричные и восьмеричные числа — это только способ представления двоичных чисел, которыми фактически оперируют микропроцессоры и ЭВМ. При этом шестнадцатеричная запись числа предпочтительнее восьмеричной, поскольку ЭВМ и микропроцессоры, применяемые в системах ЧПУ, оперируют словами длиной 4, 8, 16 или 32 бита, т.е.

словами, длина которых кратна 4. Для применения восьмеричной формы записи необходимо было бы добавлять незначащие нули. Например, восьмибитовое число можно представить в виде двух четырехбитовых, каждое из которых записывается одним шестнадцатеричным символом; шестнадцатитбитовое число представляется четырьмя четырехбитовыми и т.д.

3.2. ЦИФРОВЫЕ КОДЫ

На основе рассмотренных систем счисления строятся цифровые коды, нашедшие применение в системах ПУ.

Единичный (унитарный) код заключается в том, что программируемое число записывается в виде серии единичных импульсов, количество которых равно количеству единиц в данном числе. Например, первые десять цифр будут выражаться следующим образом:

1) 1,	6) 111111,
2) 11,	7) 1111111,
3) 111,	8) 11111111,
4) 1111,	9) 111111111,
5) 11111,	10) 1111111111.

Единичный код не может применяться для выражения дробных чисел. Поэтому выбор масштаба должен производиться с учетом требуемой точности обработки задания. Например, при точности перемещения 0,005 мм/имп "цена" единичного импульса должна составлять не более 0,005 мм. Тогда при задании перемещения на 1 м требуемое количество импульсов будет $2 \cdot 10^5$. Программа, составленная в унитарном коде, записывается на магнитную ленту. При принятой плотности записи 10 имп/мм для записи данной команды потребуется 20 м магнитной ленты. Таким образом, недостатком кода является громоздкость записи, а достоинство состоит в упрощении структуры системы ЧПУ, что особенно заметно при применении шаговых двигателей в качестве приводных устройств. Унитарный код использовался в выпускавшихся до недавнего времени системах ЧПУ типа "Контур 4МИ".

При *единично-десятичном коде* число разбивается на десятичные разряды, в каждом из которых десятичная цифра изображается в унитарном коде, т.е. заменяется соответствующим количеством единиц (импульсов). Для примера в табл. 3.2 изображено число 6835 в единично-десятичном коде.

Нормальный двоичный код заключается в представлении чисел в двоичной системе счисления. Рассмотрим число 1101010011. Чтобы перевести его в деся-

Таблица 3.2

Разряд	Множитель	Единичные знаки
0	1	11111
1	10	111
2	100	11111111
3	1000	111111

тичную систему счисления, воспользуемся формулой (3.2), в результате получим число 851. Как видно, недостатком данного кода является его малая наглядность, трудность визуального контроля. Поэтому двоичное кодирование, несмотря на экономичность, не нашло практического применения.

При двоично-десятичном взвешенном кодировании число разбивается на десятичные разряды, в каждом из которых десятичная цифра представляется кодовой комбинацией. Задача построения кода заключается в выборе веса разрядов четырехзначного двоичного кода $d_4 \geq d_3 \geq d_2 \geq d_1$ с тем, чтобы можно было выразить любую цифру из интервалов 0–9. Согласно условию,

$$d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \geq 9. \quad (3.9)$$

Нулевой разряд должен иметь вес $d_1 = 1$, иначе невозможно представить цифру 1. Для представления цифры 2 первый разряд должен иметь вес $d_2 = 1$ либо $d_2 = 2$.

Используя рассмотренные условия (3.9), можно составить 17 различных двоично-десятичных кодов. Число возможных вариантов весов разрядов двоично-десятичных кодов дано в табл. 3.3. Возможны еще перестановки весов разрядов, в результате чего можно получить дополнительно 11 вариантов. Например, из кода 4221 (см. табл. 3.3) путем перестановки можно получить код 2421, который интересен тем, что является самодополняющимся. Обоз-

Таблица 3.3

Разряд			
Нулевой	Первый	Второй	Третий
1	1	2	5
		3	5 4 6
		2	4 5 6
	2	3	3 4 5 6 7
		4	4 5 6 7 8

начение числа А в самодополняющемся коде может быть получено из обозначения числа 9—А путем инверсии знаков, т.е. замены всех нулей единицами и наоборот.

Веса разрядов 0, 1, 2 кода совпадают с весами нормального двоичного кода, поэтому изображения цифр 0, 1, 2, 3, 4 совпадают с выражениями двоичной системы счисления; следующие пять цифр 5, 6, 7, 8, 9 изображаются комбинациями, которые являются зеркальным отображением первых при инверсии знаков. Такое свойство кода позволяет упростить структуру реверсивных двоично-десятичных счетчиков.

Второй вариант кода 2421 (табл. 3.4) не является самодополняющимся, однако обеспечивает наибольшую равномерность следования выходных импульсов с импульсного умножителя, построенного на его основе. Из приведенных в табл. 3.4 кодов особое место занимает код 8421 (BCD — Binary-Coded Decimal). Кодовые изображения десятичных чисел от 0 до 9 в этом коде совпадают с их изображением в двоичном коде. Это облегчает преобразование данного кода в двоичный. Многоразрядные десятичные числа в коде 8421 (BCD) представляются путем объединения групп, кодирующих отдельные десятичные цифры. Например, число 628 в коде BCD выглядит так: $628_{10} = 011000101000_{\text{BCD}}$.

Число битов в коде должно быть фиксированным и кратно 4. Недостающие слева знаки при изображении цифр от 0 до 7 заполняются нулями. Из 16 возможных комбинаций кода используется только десять, остальные шесть являются нерабочими. Эта избыточность кода позволяет с помощью простой логической схемы контролировать правильность записанной информации путем выявления неиспользуемых комбинаций. Легкость чтения и контроля записи в коде BCD обусловила его широкое распространение в системах ЧПУ.

Существуют также коды с постоянным весом. Их особенностью является постоянство количества единиц в кодовых комбинациях. Благодаря этому упрощается контроль правильности считывания информации с перфоленты.

Таблица 3.4

Деся- тичная цифра	Код					
	8421	2421	2421	2 из 5	3 из 5	С избытком 3
0	0000	0000	0000	11000	01011	0011
1	0001	0001	0001	00011	11100	0100
2	0010	0010	0010	00101	11010	0101
3	0011	0011	0011	00110	11001	0110
4	0100	0100	0100	01001	10110	0111
5	0101	1011	0101	01010	10101	1000
6	0110	1100	0110	01100	10011	1001
7	0111	1101	0111	10001	00111	1010
8	1000	1110	1110	10010	01110	1011
9	1001	1111	1111	10100	01101	1100

Два кода с постоянным весом 2 из 5 и 3 из 5 приведены в табл. 3.4. Можно представить несколько разновидностей таких кодов. Предпочтение отдается тем, которые легко читаются на перфоленте. Код с "избытком 3" получается прибавлением $3_{10} = 0011_2$ к каждой цифре, представленной в коде BCD.

Рассмотрим сложение и вычитание в коде BCD. Трудности двоичной арифметики возникают по той причине, что в коде BCD используются лишь 10 кодовых комбинаций из возможных 16. Если при сложении получаются комбинации 1010, 1011, ..., 1111, то должен произойти перенос в следующий разряд и коррекция недопустимой комбинации. В необходимости этого можно убедиться на следующем примере. Выполним сложение чисел 23 и 49 в коде BCD:

$$\begin{array}{r}
 + \quad 23_{10} = 0010 \ 0011_{\text{BCD}} \\
 + \quad 49_{10} = 0100 \ 1001_{\text{BCD}} \\
 \hline
 0110 \ 1100 \quad (\text{неверный результат})
 \end{array}$$

Очевидно, что полученная сумма не соответствует числу 72. Кроме того, во второй группе имеется недопустимая для кода комбинация ($1100_2 = 12_{10}$). Коррекция достигается прибавлением числа $6_{10} = 0110$ к каждой недопустимой комбинации и разрешением двоичного переноса между группами:

$$\begin{array}{r}
 + \quad \quad \quad 0110 \ 1100 \\
 + \quad 6_{10} = 0000 \ 0110_2 \\
 \hline
 72_{10} = 0111 \ 0010_{\text{BCD}}
 \end{array}$$

Вторая ситуация, требующая коррекции, возникает тогда, когда сумма цифр при сложении превышает 15. В этих случаях появляются допустимые, но неверные комбинации, что обнаруживается по возникающему при сложении переносу между группами. Например, сложим числа 29 и 18 (перенос обозначим стрелкой):

$$\begin{array}{r}
 + \quad 29_{10} = 0010 \ 1001_{\text{BCD}} \\
 + \quad 18_{10} = 0001 \ 1000_{\text{BCD}} \\
 \hline
 0100 \ 0001 \quad (\text{неверный результат})
 \end{array}$$

Выполняем коррекцию

$$\begin{array}{r}
 + \quad 6_{10} = 0000 \ 0110 \quad (\text{коррекция}) \\
 \hline
 47_{10} = 0100 \ 0111_{\text{BCD}} \quad (\text{сумма})
 \end{array}$$

При вычитании в коде 8421 возникает ситуация, когда необходим заем между группами чисел. При двоичном вычитании такой заем эквивалентен 16_{10} , в то время как при десятичном вычитании он равен 10_{10} . Таким обра-

зом, возникает излишек при заеме $16_{10} - 10_{10} = 6_{10} = 0110$. Чтобы компенсировать этот излишек, необходимо произвести вычитание из той группы цифр, которая получила заем (показан стрелкой). Сказанное покажем на примере:

$$\begin{array}{r}
 54_{10} = 0101 \overset{\text{заем}}{\curvearrowright} 0100_{\text{BCD}} \\
 - 19_{10} = 0001 \ 1001_{\text{BCD}} \\
 \hline
 0011 \ 1011 \text{ (неверный результат)} \\
 - 6_{10} = 0000 \ 0110_2 \text{ (коррекция)} \\
 \hline
 35_{10} = 0011 \ 0101_{\text{BCD}} \text{ (разность)}
 \end{array}$$

Некоторые микропроцессорные системы снабжаются программными средствами для обнаружения указанных ситуаций и выполнения коррекций.

Определим *арифметические и комбинаторные коды*. Код, обладающий арифметическими свойствами, называется *арифметическим*. Над комбинациями кода можно производить арифметические операции. Коды на основе позиционных систем счисления и код 8421 являются арифметическими. Код, не обладающий арифметическими свойствами, называется *комбинаторным* (по названию раздела математики – комбинаторики, изучающей сочетания, размещения, перестановки). Равновесные коды 2 из 5, 3 из 5 (см. табл. 3.4) относятся к классу комбинаторных.

Важным классом комбинаторных кодов являются однопеременные коды. *Однопеременным* называется код, у которого кодовое расстояние равно единице, т.е. при переходе от одной кодовой комбинации к соседней знак изменяется лишь в одном разряде, например 0110, 0111, 0101 и т.д. Построить однопеременный код можно с помощью диаграммы Карнауга (рис. 3.1), которая имеет 4 строки и 4 столбца. На их пересечении образуется 16 ячеек. Каждая строка и каждый столбец нумеруется (см. рис. 3.1). Адрес каждой ячейки образуется, таким образом, из номера строки и номера столбца. Для получения однопеременного кода задается направление обхода ячеек диаграммы и последовательно выписываются их адреса. Для направления, указанного на рис. 3.1, а, запишем 16 кодовых комбинаций (табл. 3.5). Такой код называется *кодом Грея*. Для построения двоично-десятичного однопеременного кода можно ограничиться десятью кодовыми комбинациями (рис. 3.1, б); можно выбрать для обхода другие вершины (рис. 3.1, в, табл. 3.5). Сформулируем общие правила для получения однопеременного кода на основе диаграммы Карнауга: 1) направление обхода выбирается произвольно; 2) одну и ту же вершину нельзя обходить дважды; 3) запрещается движение по диагонали.

Применение кода Грея повышает надежность кодирования, что поясняется следующим образом. При использовании арифметических кодов часто возникает ситуация, когда изменение кодируемой величины на единицу одновременно изменяет знаки во всех разрядах кода. Примером может служить ситуация $0111 + 1 = 1000$. В таких случаях возможны значительные ошибки. Например, при считывании информации с кодового датчика положения цифра старшего разряда может появиться прежде, чем все остальные, и в течение некото-

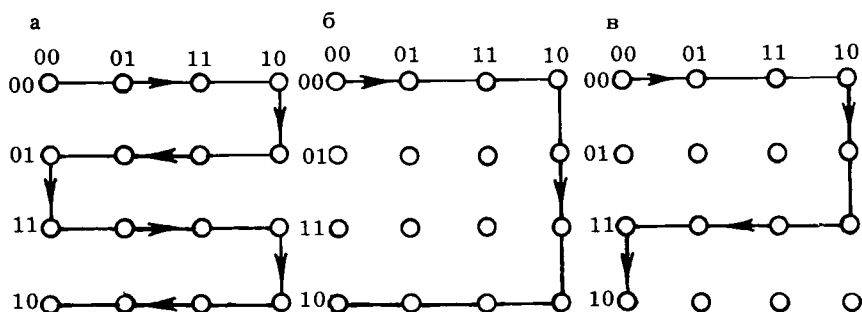


Рис. 3.1. Диаграмма Карнауга.

Таблица 3.5

Десятичное число	Двоичный код	Однопеременный код		
		код Грея	двоично-десятичный однопеременный	
			вариант 1	вариант 2
0	0000	0000	0000	0000
1	0001	0001	0001	0001
2	0010	0011	0011	0011
3	0011	0010	0010	0010
4	0100	0110	0110	0110
5	0101	0111	1110	1110
6	0110	0101	1010	1111
7	0111	0100	1011	1101
8	1000	1100	1001	1100
9	1001	1101	1000	1000
10	1010	1111		
11	1011	1110		
12	1100	1010		
13	1101	1011		
14	1110	1001		
15	1111	1000		

рого времени будет зафиксировано число 1111. Коды Грея свободны от этого недостатка; в то же время они не обладают наглядностью, что затрудняет визуальный контроль информации.

3.3. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОДОВ

В реальных условиях эксплуатации системы ЧПУ кодовая комбинация может искажаться под воздействием промышленных помех. *Помехоустойчивым* называют такое кодирование, при котором ошибку можно обнаружить или обнаружить и исправить. *Кратностью ошибки* называют число искаженных

символов. Имеются коды, обнаруживающие и исправляющие *одиночные ошибки*, двойные ошибки и т.д.

Простейшим способом повышения надежности кодовых передач является контроль кода на четность (или нечетность). В этом случае наряду с информационными позициями кода имеется одна контрольная, которая заполняется так, чтобы закодированное слово содержало четное (нечетное) число единиц. При приеме информации специальная схема контролирует четность (нечетность) кода, и в случае ее нарушения формируется сигнал о наличии ошибки. Подобный контроль реализован в коде ISO-7 bit. Недостаток такого способа контроля состоит в том, что при двойной ошибке четность кода не нарушается и наличие искажения кода не обнаруживается. Кроме того, рассматриваемый способ контроля не дает возможности исправить обнаруженную ошибку.

Таблица 3.6

Числа программы	Позиция кода							
	8	7	6	5	4	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1	1
2	1	0	1	0	1	0	1	0
3	1	1	1	0	0	0	0	1
4	1	0	0	1	1	0	0	1
5	1	1	0	1	0	0	1	0
6	0	0	1	1	0	0	1	1
7	0	1	1	1	1	0	0	0
8	1	0	0	0	0	1	1	1
9	1	1	0	0	1	1	0	0
10	0	0	1	0	1	1	0	1
11	0	1	1	0	0	1	1	0
12	0	0	0	1	1	1	1	0
13	0	1	0	1	0	1	0	1
14	1	0	1	1	0	1	0	0
15	1	1	1	1	1	1	1	1

Примечание. Позиция 8 служит для проверки четности всего кода.

Таблица 3.7

Номер		
проверки	контрольной позиции	позиции проверяемой группы
1	1	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, ...
2	2	2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, ...
3	4	4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 20, ...
4	8	8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 24, 25, ...

Дальнейшее повышение надежности может быть достигнуто применением кода с обнаружением и исправлением одиночной ошибки или кода с обнаружением двойной и исправлением одиночной ошибки. В этом случае число позиций кода $N = n + k$, $k = f(n)$, где n — число информационных позиций (рабочих); k — число контрольных позиций. Например, при $n = 4$ для кода с обнаружением двойной и исправлением одиночной ошибки $k = 4$.

Составим код, приведенный в табл. 3.6, в которой контрольные позиции даны в рамках. Позиции 1, 2, 4 служат для обнаружения и исправления одиночной ошибки. С этой целью код разбивается на группы, каждая из которых проверяется на четность. Порядок проверки групп приведен в табл. 3.7.

Порядок заполнения контрольных позиций рассмотрим на примере записи числа 6, которое в двоичной форме имеет вид 0110. Выпишем эти цифры в информационных позициях кода 3, 5, 6 и 7 и произведем первую проверку на четность позиций 1, 3, 5, 7. Из условия четности в контрольную позицию 1 необходимо вписать единицу. В результате получим запись 011—0—1 (тире означает незаполненную позицию).

После второй проверки (для позиций 2, 3, 6, 7) находим, что в контрольной позиции 2 также должна быть записана 1. Теперь уже имеем код 011—011 (тире — незаполненная позиция). Аналогично после третьей проверки позиций 4, 5, 6, 7 получим код 0110011. Наконец, проверяя четность кода в целом, заполняем контрольную позицию 8 и получаем код 00110011.

Предположим теперь, что принят код 00011010. Из табл. 3.6 видим, что этот код неправилен, т.е. не соответствует ни одному из чисел кодовой таблицы.

Произведем проверку на четность групп кода. Первая проверка показывает наличие ошибки (сумма цифр позиций 1, 3, 5, 7 нечетна). Фиксируем наличие ошибки цифрой 1. Вторая проверка тоже показывает наличие ошибки (сумма цифр позиций 2, 3, 6, 7 нечетна). Фиксируем это обстоятельство, поставив еще одну единицу слева от первой, т.е. получим 11.

Третья проверка позиций 4, 5, 6, 7 дает четную сумму цифр. В этом случае ошибки нет. Отмечаем это, поставив 0 слева от записанной ранее единицы. В результате получаем двоичное число $011 = 3$, показывающее, что ошибка принята в третьей позиции. Исправляем цифру позиции 3 на противоположную и получаем код $00011110 = 12$.

До сих пор позиция 8 не использовалась для проверок. Теперь проверяем на четность весь код и убеждаемся в его правильности. Если бы был принят код 10011010, то после трех проверок мы получили бы код 10011110, и проверка на четность показала бы, что в данном случае имеется еще одна ошибка, так как результирующий код не удовлетворяет условию четности.

3.4. СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ПРОГРАММНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Любая технологическая операция состоит из двух частей — из информации о содержании команды (включение или отключение органов управления, величина перемещения и др.) и из адреса, т.е. названия рабочего органа, которому эта команда предназначена.

Совокупность закодированных команд, содержащих всю информацию, необходимую для обработки определенного участка детали, составляет содержа-

ние одного кадра (или фразы) программы. Минимальный объем информации, имеющий законченный характер (например, номер кадра или информация для определения работы одного исполнительного органа станка), образует *слово*. Несколько слов, образующих полную информацию для законченного технологического перехода (например, обработка одного участка детали), составляют *фразу*, или *кадр программы*.

В практике программного управления используются *три основных способа задания программ*: кадрами постоянной длины, кадрами переменной длины (табуляционный способ) и адресный. Иногда применяется адресно-табуляционный способ записи информации.

При записи программы *кадрами постоянной длины* каждой команде отведено определенное число строк в пределах кадра. Адрес определяется местом числовой информации в кадре. Преимуществом такой системы записи является возможность одновременного считывания всей информации, содержащейся в кадре.

Для записи программы *кадрами переменной длины* кодируемые команды также располагаются в определенном порядке, однако каждая команда в зави-

Таблица 3.8

Команда управления (адрес)	Сокращенное обозначение команды	Числовой эквивалент команды	Команда управления (адрес)	Сокращенное обозначение команды	Числовой эквивалент команды
Конец фразы	Н	0	Вспомогательные команды	В	8
Перемещение по оси координат 1 (X)	Е	1	Направление "+"	1	1
То же, по оси координат 2 (Y)	Д	2	Направление "-"	2	2
То же, по оси координат 3 (Z)	Т	3	Конец программы	ЯН	9
Номер кадра	К	4	Перемещение по оси координат 4	ЯЕ	10
Подача	П	5	То же, по оси координат 5	ЯД	11
Шпиндель (обороты или скорость)	Ш	6	Резерв	ЯК	13
			— „ —	ЯП	14
Смена инструмента	С	7	—	—	—

симости от объема информации может занимать различное число строк перфоленты. Считывание информации осуществляется последовательно. Для разделения информации, относящейся к различным командам внутри кадра, применяются специальный табуляционный знак (ТАВ), который кодируется на отдельной строке после числовой информации. Знак используется для подачи команды, по которой переключается выход считывающего устройства на следующий исполнительный механизм станка или следующую ячейку ЗУ. В случае отсутствия какой-либо команды в данном кадре дополнительно кодируется разделительный знак ТАВ сразу же вслед за разделительным знаком предыдущей команды. При табуляционном способе на перфоленте не остается неиспользованной площади.

При *адресном способе* записи программы перед каждой командой кодируется ее адрес, который вызывает необходимые переключения на выходе считывающего устройства для направления числовой информации к соответствующим исполнительным механизмам или ячейкам памяти. Как и в предыдущем случае, информация считывается последовательно. Этот способ записи особенно удобен для станков, в которых система ЧПУ может исполнять большое число разнообразных команд, но при обработке деталей требуется одновременное выполнение лишь небольшой части из них.

Для записи информации на пятидорожечной перфоленте использован буквенно-цифровой код БЦК-5 (буквенно-цифровой код пятидорожечный), построенный на базе двоично-десятичного кода, рекомендуемые адреса которого приведены в табл. 3.8.

БЦК-5 является унифицированным кодом (кодирование цифровой и буквенной информации) и используется для адресного способа записи программ.

В коде БЦК-5 в каждой строке перфоленты кодируется либо цифра либо буква. Цифровая информация записывается двоично-десятичным кодом. Цифры от 0 до 9 в двоичной системе счисления кодируются на четырех дорожках, пятая дорожка при этом не используется. Она служит только для записи буквенной информации. Наличие отверстия на пятой дорожке означает, что в данной строке закодирована буква.

Различными комбинациями отверстий на четырех дорожках строки в сочетании с отверстием на пятой дорожке кодируют 10 букв (см. табл. 3.8). Для удобства чтения и записи большинство букв выбрано так, что они являются начальными в словах, определяющих числовое значение данного символа: ноль (Н), единица (Е), двойка (Д), тройка (Т) и т.д. Предусмотрено кодирование направления перемещений: положительное направление (+) — цифрой 1, отрицательное (−) — цифрой 2.

Код БЦК-5 является незащищенным, т.е. в нем не предусмотрен контроль правильности записанной информации, поэтому *контроль* записи и считывания информации осуществляется *по модулю*.

Числом по модулю m называется число K , которое должно быть добавлено к данному числу n , чтобы оно делилось на m без остатка, т.е. $\text{mod}_m(n) = K$, где $K = m - (n - m(n/m))$, (n/m) — целая часть от деления n/m . Например, 43 по модулю 10 будет: $K = 10 - (43 - 10(43/10)) = 7$; т.е. $\text{mod}_{10}(43) = 7$. При $m = 9$ $\text{mod}_9(43) = 2$.

Для записи команды в коде БЦК-5 используется перфолента шириной

17,5 мм и телеграфный аппарат СТА-35. Клавиатура перфоратора состоит из ряда ключей, при нажатии на которые автоматически производится кодирование в двоично-десятичной системе счисления.

Код БЦК-5 нашел применение для ранее разработанных систем ПУ типа УМС-2, "Контур-2П", СЦМ-4М и др. При составлении программы рекомендует-

Таблица 3.9

Символ адреса	Кодируемая информация	Число разрядов для кодирования
A	Поворот вокруг оси X	5-7
B	То же, Y	5-7
C	То же, Z	5-7
D	Поворот вокруг специальной оси или третья функция подачи	
E	То же, вторая	
F	Подача (100 команд)	3
G	Подготовительные функции (100 команд)	2
I, J, K	Начальные координаты (соответственно по осям X, Y, Z) дуги окружности относительно ее центра	
L	Коррекция	
M	Вспомогательные функции (100 команд)	2
N	Номер блока информации, фразы, кадра (1000 номеров)	3
P, Q, R	Дополнительное указание по перемещению (третичному) параллельно осям X, Y, Z (соответственно) или произвольно	5-7
S	Частота вращения привода главного движения (100 скоростей)	2
T	Код инструмента (100 команд)	2
U, V, W	Дополнительное указание по перемещению (вторичному) параллельно осям X, Y, Z или произвольно	5-7
X	Перемещение вдоль оси X	5-7
Y	То же, Y	5-7
Z	То же, Z	5-7
+, -	Направление перемещения	
:	Признак восстановления информации	
ГТ	Горизонтальная табуляция	
LF (ПС)	Конец фразы (кадра)	
%	Начало программы	
(	Отключение управления (информация на ленте не воспринимается СЧПУ)	
)	Включение управления	
DEL (ЗБ)	Забой (строка не читается)	
TAB	Табуляция	
BS	Возврат каретки на шаг	
CR	Возврат каретки	

ся следующая последовательность расположения информации в кадре: контрольное число; номер кадра; адрес; направление; код команды по оси X и т.д.; конец кадра или конец программы.

Пример 3.1. Записать два кадра программы: 1) кадр № 019 ($X = +2315$; $Y = -1634$; код подачи 69, код инструмента 27, охлаждение включить); 2) кадр № 020 ($Y = +9615$; $Z = -0253$; код инструмента 75, охлаждение выключить).

Предварительно установим вспомогательные команды. Для включения охлаждения примем код 1, для выключения код 2. Необходимо также знать предельное число строк, занимаемых каждым словом. Например, номер кадра занимает три строки, перемещения по координатам — по четыре строки. Лишние строки заполняются нулями (например, номер кадра, перемещение по оси Z).

Запись кадров программы в текстовой форме имеет вид:

8K019	E12315	D21634	П69	C27	В1Н
1K020	D19615	T20253	C75	В2ЯН	

Контрольное число определено по модулю 10. Для его вычисления иногда находят сумму всех чисел и числовых эквивалентов адресов, содержащихся в кадре. Очевидно, более верным будет учет признака буквы (пробивка на пятой дорожке) с числовым эквивалентом 16. Коды по адресам П, Ш, С, В действуют в последующих кадрах до ввода нового кода по данному адресу. Для отмены информации по данным адресам кодируется адрес с двумя нулями, например Ш00, С00.

3.5. МЕЖДУНАРОДНЫЙ ДВОИЧНО-ДЕСЯТИЧНЫЙ КОД ISO-7 bit

Код ISO-7 bit является адресным и предусматривает применение восьми дорожечной перфоленты. В коде применяется двоично-десятичная система счисления. Для обозначения адресов используются заглавные буквы латинского алфавита (табл. 3.9). Для кодирования знаков и заглавных букв всего латинского алфавита, а также для кодирования признаков всех составляющих частей кода применены семь двоичных разрядов (7 bit). Правильность информации, записанной на каждой строке перфоленты, контролируется по модулю 2, т.е. на четность числа пробивок. Для контроля четности применяется восьмая дорожка перфоленты. Аналогичная система кодирования применена в коде по ГОСТ 13052—74.

Для того чтобы различать знаки, цифры и буквы (например, на первых четырех дорожках одинаково кодируются %, 5, E, U), используются последующие три дорожки — пятая, шестая, седьмая (рис. 3.2).

Код ISO предусматривает взаимозаменяемую структуру определения значения каждого слова информации. Это объясняется тем, что в большинстве случаев информация перфорируется на ленте одновременно с печатанием бланка (как при использовании телетайпа).

Первое слово кадра имеет в начале буквенный символ, за которым следуют цифры (N021, F356, X098123, T17 и т.д.). Буквы адресов и кодируемая ими информация приведены в табл. 3.9.

Приведем состав кадра программы. Первой информацией на перфоленте является слово "начало программы" (%), которому предшествует примерно 1 м "пустой" ленты. На ленте можно записать название программы. Дальнейшая информация начинается со слова, обозначающего порядковый номер, сос-

При кодировании информации в кадре соблюдаются следующие общие правила: 1) в одном кадре может быть только одна команда для одного адреса; 2) если некоторые адреса не соответствуют данному конкретному станку, они могут быть полностью опущены; 3) каждый кадр должен состоять из слов: порядковый номер, подготовительная функция, размерные слова, подача, скорость шпинделя, номер инструмента и вспомогательные команды (в порядке NGXYZUVWQRABCDEFSTM); 4) табуляционный знак ставится перед каждым словом; перед порядковым номером кадра и в конце кадра этот знак не ставится; 5) за последним словом кадра идет слово "конец кадра" (LF).

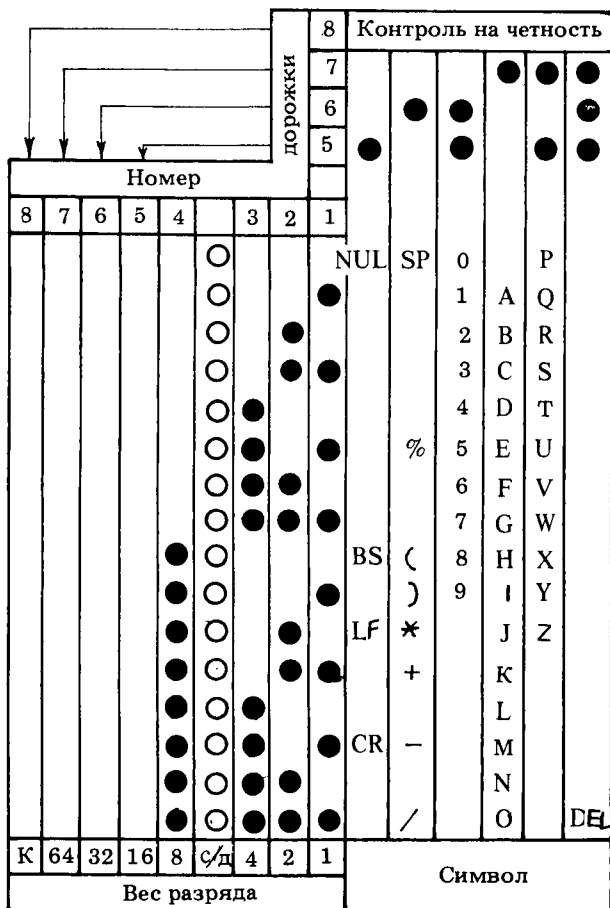


Рис. 3.2. Код ISO-7 bit.

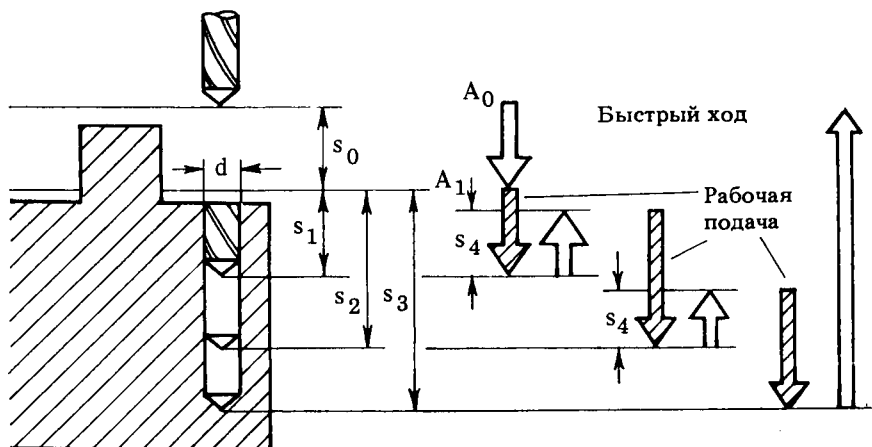


Рис. 3.3. Цикл глубокого сверления.

Некоторые из символов кадра нуждаются в пояснении. Признак восстановления информации ":" записывается перед кадром, в котором кодируется вся информация для начала или повторного начала обработки. В этом случае данный символ применяется вместо символа "N" в качестве адреса номера кадра. Символ ":" можно также использовать в качестве признака для остановки в нужном месте программы при обратной перемотке ленты.

Символ начала программы "%" должен предшествовать первому символу "конец кадра". Он используется для остановки в начале программы при обратной перемотке ленты.

Информация, записанная между символами "(" и ")", не воспринимается системой ЧПУ. Эти символы удобно применять, когда возможна обработка заготовок с разными припусками. Дополнительные проходы, рассчитанные с учетом максимального припуска, заключаются в скобки. В зависимости от реальных размеров заготовки эти операции выполняются по команде оператора. Запись внутри скобок не должна содержать символов ":" и "%". При появлении символа DEL (3B) ("забой") соответствующая строка пропускается, т.е. не воспринимается системой управления.

Слово *подготовительной функции (команды)* состоит из буквы адреса G, за которой следуют две цифры кодового номера. Слово G располагается за порядковым номером кадра. В коде предусмотрено 100 возможных подготовительных функций.

Пользование адресом G можно показать на примере глубокого сверления нескольких отверстий (рис. 3.3). Цикл сверления состоит из ряда последовательных движений на быстром ходу и на рабочей подаче (A_0 — исходное положение инструмента, A_1 — начало рабочего хода). Программа обработки одного отверстия составляется подробно, и ей присваивается номер цикла (один из номеров 81–89). При обработке следующего отверстия в кадре указывается лишь номер цикла, и движения сверлильной головки повторяются в соответ-

Адрес	Наименование операции	Описание цикла
G81	Сверление	Быстрый подвод шпинделя при его вращении по часовой стрелке на расстояние, определяемое адресом R, рабочая подача на длине Z и быстрый возврат на величину R + Z
G82	Сверление с остановкой	То же, что и в G81, но с остановкой в нижней части отверстия
G83	Сверление глубоких отверстий	То же, что и в G81, но с несколькими быстрыми движениями назад к исходному положению рабочей подачи, снова рабочая подача
G84	Нарезание резьбы метчиком	То же, что и в G81, но в нижней части отверстия реверс подачи и вращения шпинделя до начальной позиции рабочей подачи, затем быстрое движение к исходному положению
G85	Растачивание 1	То же, что и в G84, но без реверса вращения шпинделя
G86	Растачивание 2	То же, что и в G84, но с остановкой шпинделя в нижней части отверстия
G87	Растачивание 3	То же, что и в G86, но с ручным управлением подачей при выводе инструмента из отверстия
G88	Растачивание 4	То же, что и в G87, но с остановкой в конце отверстия перед выключением шпинделя
G89	Растачивание 5	То же, что и в G85, но с остановкой в нижней части отверстия

ствии с хранящейся в ЗУ программой. Содержание автоматических циклов приведено в табл. 3.10.

Размерные слова должны появляться в следующем порядке: X, Y, Z, U, V, W, P, Q, R, A, B, C, D, E.

Символы D и E могут быть поочередно использованы вместе с F, как слова функции подачи. Наименования осей, к которым относятся размерные слова на конкретном станке, приведены в табл. 3.9.

Для конкретного станка размерные слова выражаются либо в абсолютных значениях координат, либо в приращениях относительно предыдущего значения. Эти числа имеют в начале цифру старшего разряда. Напомним, что недостающие разряды дополняются нулями.

Системы управления, работающие с приращениями, нуждаются в кодировании положительных и отрицательных чисел.

Слово "подача" F (100 команд) используется при движении только по одной оси. Оно должно следовать непосредственно за размерным словом. Если слово "подача" используется для двух или более осей движения, то оно записывается за последним размерным словом. Допустим, для движения по осям X и Y требуется подача F_1 , а по оси Z — подача F_2 . В этом случае информацию следует расположить в разных кадрах, и движение по оси Z будет происходить после движений по осям X и Y.

Если позволяет система управления, в одном кадре можно задавать различные величины подачи, используя символы D и E.

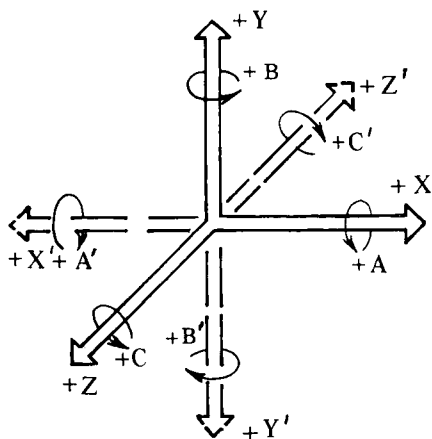


Рис. 3.4. Расположение осей координат.

Каждое слово "подача" состоит из адресного символа F (E или D) и цифр, которые определяют величину подачи.

Код "скорость шпинделя" S (100 команд) следует после всех размерных слов и слова "подача", и ему также предшествует символ TAB. Вслед за адресом S записывается число, определяющее значение скорости.

Код "выбор инструмента" T (100 команд) следует за словом S после символа TAB. За буквой T записывается кодовый номер, который в соответствии с анкетой технических данных станков, где зашифрованы номера применяемых инструментов, определяет его вид. Например, для сверлильного станка, имеющего одну шестипозиционную сверлильную головку, код "выбор инструмента" записывается так: T1, T2, ..., T6. По коду инструмент выбирается автоматически или дается указание оператору.

Код "вспомогательная функция" M (100 команд) следует за словом T. Вслед за адресной буквой M записывают двухцифровое кодовое число. Слово M управляет такими действиями станка, как вращение шпинделя, включение — выключение охлаждения, зажим—отжим приспособлений и др.

Международная организация по стандартизации ISO рекомендует также *направление осей координат* и поворотов вокруг них (рис. 3.4). Соответствующие движения инструмента на станке обозначают буквами X, Y, Z, A, B, C. Если на станке перемещается обрабатываемая деталь, то направление меняют на противоположное и обозначают буквами X', Y', Z', A', B', C'. Ось X располагается всегда горизонтально, а ось Z всегда совмещается с осью инструмента (для токарного станка — с осью шпинделя).

Направление вращения вокруг осей координат определяется по *правилу правой руки*: большой палец располагается вдоль положительного направления оси. Тогда изогнутые пальцы руки указывают положительное направление вращения.

3.6. КОНТРОЛЬ ИНФОРМАЦИИ В КОДЕ ISO-7 bit

При кодировании, считывании и передаче информации возможны помехи, искажающие кодовую комбинацию. Коды, обеспечивающие помехоустойчивое кодирование, называют *помехоустойчивыми*. Для контроля передачи информации наибольшее распространение получили методы информационной избыточности, использующие коды с обнаружением и коррекцией ошибок.

Двоичным кодом можно представить максимум 2^n различных слов, где n — число разрядов. Если все разряды слова служат для представления информации, код называется *простым (неизбыточным)*. Коды, у которых для представления информации используются лишь части слов, называются *избыточными*.

ми. Например, при общей длине кодовой комбинации n для передачи сообщений используется лишь k разрядов, называемых информационными. Остальные $n - k$ разрядов, называемые контрольными, служат для обнаружения или исправления ошибки.

Принцип обнаружения ошибки заключается в проверке кодовой комбинации. Если при контроле обнаруживается запрещенная комбинация, то это говорит о наличии ошибки. Для контроля применяются различные операции. Чаще всего осуществляют контроль по модулю 2 (контроль четности, нечетности). При таком контроле к n -разрядному коду двоичного слова $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ добавляется один контрольный разряд x_{n+1} . В нем размещается код, соответствующий четному или нечетному числу единиц, содержащихся в n -разрядном слове. Код разряда x_{n+1} выбирается так, чтобы сумма

$$\sum_{i=1}^{n+1} x_{i \bmod 2} = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n \oplus x_{n+1}$$

была четной (равна нулю) или нечетной (равна единице). При этом соблюдают

следующие эквивалентности: для кода четности $x_{n+1} = \sum_{i=1}^n x_{i \bmod 2}$; для ко-

да нечетности $x_{n+1} = \sum_{i=1}^n x_{i \bmod 2}$.

Такой контроль позволяет обнаружить одиночную ошибку. Пусть правильная комбинация в коде ISO-7 bit имеет вид 0110101. Количество единиц четное, поэтому в восьмом разряде при контроле на четность единица не фиксируется. Кодовые комбинации с одиночной ошибкой 0110100, 0110001, 0010101, 1110101 будут обнаружены системой контроля, поскольку содержат нечетное число единиц. Ошибочные комбинации вида 0101101, 0110110 и подобные системой не устанавливаются, поскольку содержат разрешенное, т.е. четное, число единиц. Такие ошибки называются двойными. Практика показывает, что подавляющее число ошибок являются одиночными, поэтому контроль по модулю 2 является достаточно надежным.

Схемы, обеспечивающие получение кода x_{n+1} , называются *схемами сверток по модулю 2* или *схемами контроля четности (нечетности)*. Наиболее про-

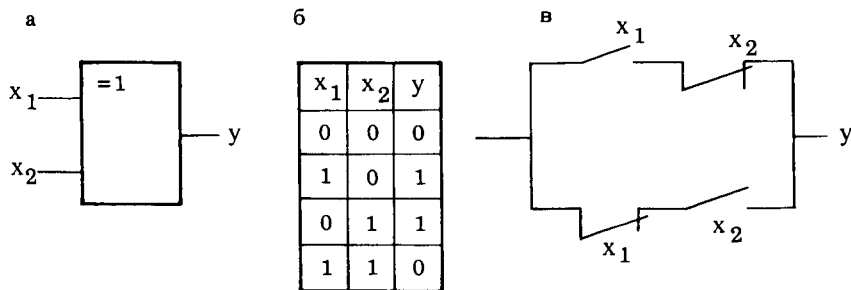
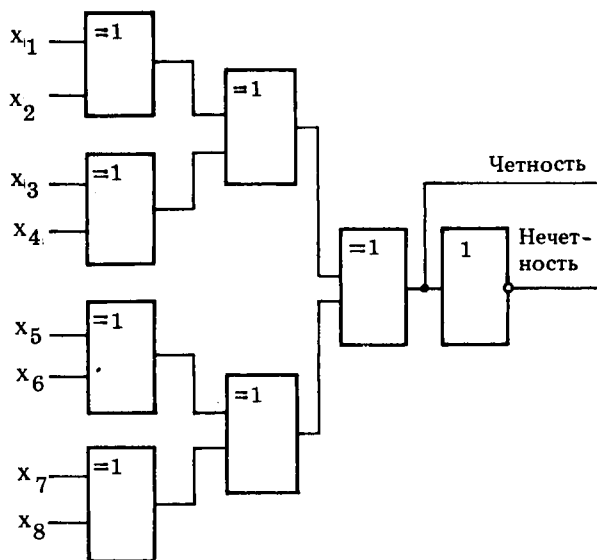
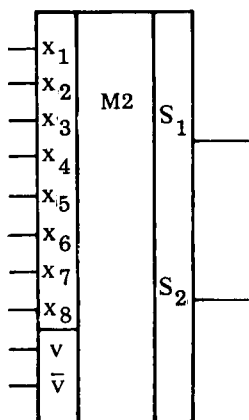


Рис. 3.5. Обозначение элемента "исключающее или" (а), таблица истинности (б) и его релейный эквивалент (в).

а



в



б

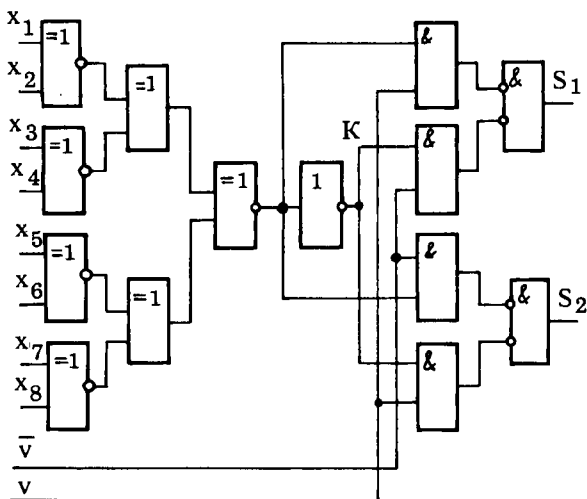


Рис. 3.6. Пирамидальная схема контроля четности (а), микросхема К155ИП2 (б) и ее условное обозначение (в).

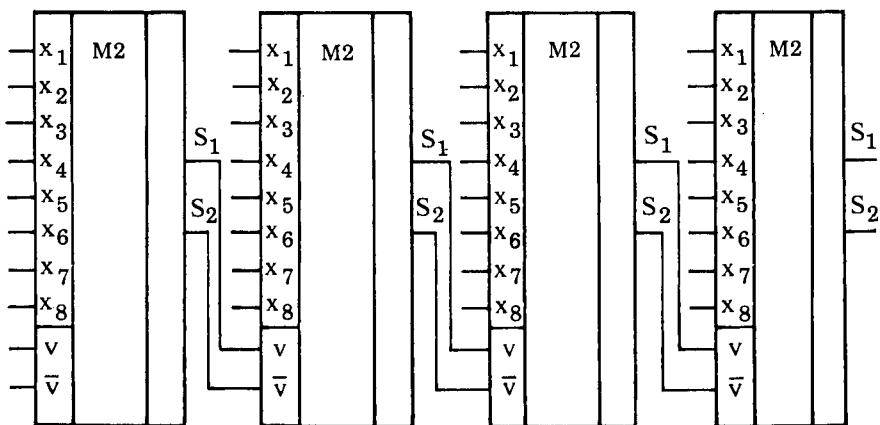


Рис. 3.7. 32-разрядная схема контроля четности (нечетности) на микросхемах К155ИП2.

Таблица 3.11

Вход Сумма единиц $x_1, \dots, x_8$ на входах	Выход			
	Управляющий		S_1 (четный)	S_2 (нечетный)
	v (четный)	$\bar{v}$ (нечетный)		
Четная	1	0	1	0
Нечетная	1	0	0	1
Четная	0	1	0	1
Нечетная	0	1	1	0
При любых $x_1, \dots, x_8$	0	0	1	1
То же	1	1	0	0

сто такие схемы реализуются с помощью элемента "исключающее или" (неэквивалентность) (рис. 3.5). На рис. 3.6, а дана пирамидальная схема, обеспечивающая получение кода четности (нечетности). Элементы "исключающее или" выпускаются в составе серийных интегральных микросхем: в серии К155 и КМ155 — восьмизрядная схема контроля четности и нечетности (К155ИП2 и КМ155ИП2) (рис. 3.6, б); в серии К500 — схема контроля четности на 12 входов (К500ИЕ160). На рис. 3.6, в показаны восемь информационных входов $x_1, x_2, \dots, x_8$, два управляющих входа v и $\bar{v}$ и выходы S_1 (соответствует четному числу единиц) и S_2 (нечетному). Схема контроля четности и нечетности функционирует согласно таблице истинности (табл. 3.11). Пирамидальная часть схемы описывается уравнением

$$K = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 \oplus x_5 \oplus x_6 \oplus x_7 \oplus x_8 ,$$

что эквивалентно уравнению

$$K = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 \oplus x_5 \oplus x_6 \oplus x_7 \oplus x_8 = \sum_{i=1}^8 x_i \bmod 2$$

Во второй части схемы (см. рис. 3.6, в) осуществляются преобразования $S_1 = \overline{K} \oplus v$; $S_2 = K \oplus v$. С помощью такой схемы код $v\overline{v} = 11$ или $v\overline{v} = 00$ преобразуется в код $S_1 S_2 = 00$ и $S_1 S_2 = 11$ соответственно при любых состояниях информационных входов. Входы v и $\overline{v}$ служат основой для построения схем контроля четности и нечетности при большем числе информационных входов. Как известно, многие цифровые устройства ЧПУ — микропроцессоры и микроЭВМ — часто оперируют с 16- и 32-разрядными словами. На рис. 3.7 приведена 32-разрядная схема, в которой код $v\overline{v}$, подаваемый на первую микросхему, управляет полярностью сигналов S_1 и S_2 на выходе. Изменение кода $v\overline{v} = 01$ на код $v\overline{v} = 10$ приводит к инвертированию кода на выходах $S_1 S_2$ при неизменных сигналах информационных входов, что соответствует табл. 3.11.

4. ПОДГОТОВКА УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ ЧПУ

4.1. РУЧНАЯ ПОДГОТОВКА УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ

Исходная информация для подготовки *управляющей программы* (УП) содержится в чертеже детали, выполненном инженером-конструктором. Задачи перевода информации, заключенной в чертеже, на язык, воспринимаемый системой ЧПУ, решаются технологом-программистом. Преобразованная таким образом информация и есть УП.

Под УП будем понимать объем информации, зафиксированной на одном из видов программносителей, достаточный для выполнения требуемой технологической операции по обработке изделия. УП представляется в виде буквенно-цифрового кода и может быть подготовлена ручным или автоматизированным (автоматическим) методом.

При ручном программировании, применяемом в основном при малом количестве станков с ЧПУ, на основании чертежа детали составляют таблицу с программой, в которой зафиксированы все рабочие движения станка во временной последовательности. Расчеты выполняются вручную с использованием простейших вычислительных средств.

Обработка информации чертежа производится в такой последовательности (рис. 4.1): 1) выбирается система координат (в соответствии с рекомендациями ISO), и ее начало совмещается с исходной точкой, в которую удобно "выставить" инструмент или деталь перед началом обработки; 2) проставляются размеры детали относительно координатных осей, выбираются опорные точки и назначается последовательность их обхода; на этой основе готовится рабочий чертеж; 3) аппроксимируются типовыми кривыми траектории движения между опорными точками с учетом возможностей системы ЧПУ (отрезками прямых, дугами окружностей, участками параболы и т.д.); аппроксимация криволинейных участков отрезками прямых требует назначения дополнительных опорных точек и расчета погрешности аппроксимации; 4) обрабатывается технологическая информация (назначаются режимы резания, инструменты и т.д.) и составляется технологическая карта; 5) определяются приращения координат опорных точек в единицах длины и переводятся в число дискрет в соответствии с разрешающей способностью системы ЧПУ; приращения координат сопровождаются знаками + и -; для дуг окружностей дополнительно указывается направление обхода; 6) производится запись программы в текстовой форме; полученная УП наносится на перфоленту.

При интерполяции воспроизводится движение рабочего органа по заданной траектории. Участок интерполяции может быть записан в одном или более кадрах программы. Характер интерполируемой линии (прямая или окружность) задается G-функцией. Начальная точка каждого участка интерполяции совпадает с конечной точкой предыдущего участка. Геометрическая информация о величине и направлении перемещения задается в приращениях. При ли-

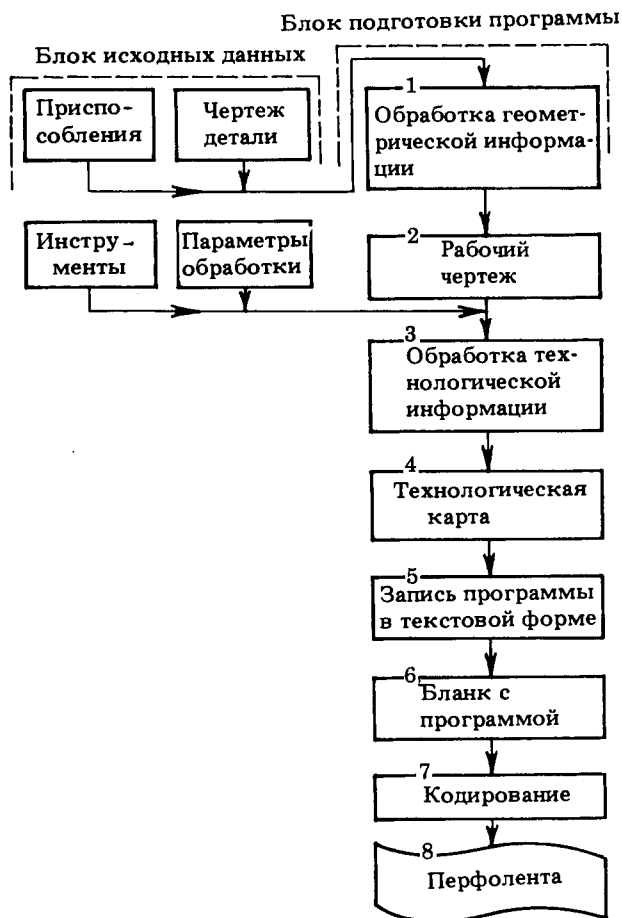


Рис. 4.1. Алгоритм ручной подготовки управляющих программ.

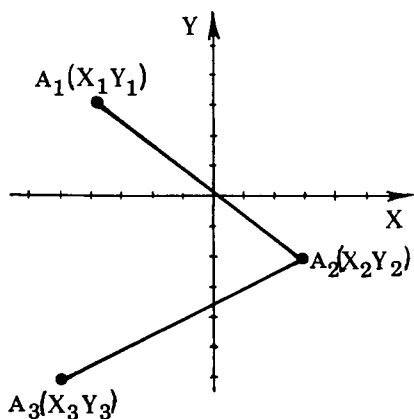


Рис. 4.2. Участок линейной интерполяции.

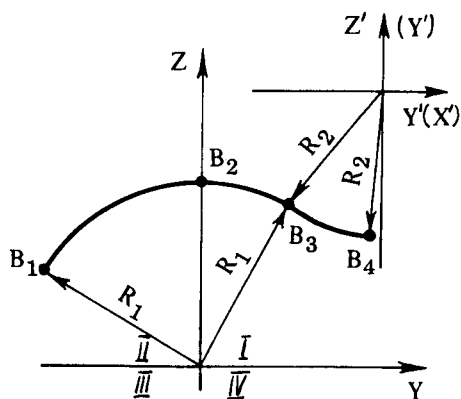


Рис. 4.3. Участок круговой интерполяции.

нейной интерполяции кадр программы включает: 1) подготовительную функцию G01, если она не была указана в предыдущем кадре; 2) параметры перемещения по координатам X, Y, Z , которые тождественны приращениям координат конечной точки обрабатываемого отрезка.

Рассмотрим программирование участка линейной интерполяции (рис. 4.2). Координаты опорных точек (мм): $X_1 = -40$; $Y_1 = +30$; $X_2 = 30$; $Y_2 = -20$; $X_3 = -50$; $Y_3 = -60$. Для перемещения из точки A_1 в точку A_3 требуются два кадра. Вычислим приращения для первого кадра: $\Delta x_1 = X_2 - X_1 = 70$ мм; $\Delta y_1 = Y_2 - Y_1 = -50$ мм. Для второго кадра $\Delta x_2 = X_3 - X_2 = -80$ мм; $\Delta y_2 = -40$ мм.

Количество строк в кадрах равно семи. Первая строка, следующая после признака адреса, отводится для кодирования направления перемещения, а следующие шесть строк — для кодирования величины перемещения.

Если дискретность системы ЧПУ $\delta = 0,01$ мм (паспортное значение, например, для систем ЧПУ типа H33), то параметры перемещений в первом кадре: $X = +007000$, $Y = -005000$; во втором: $X = -008000$, $Y = -004000$.

При программировании круговой интерполяции всегда указывается плоскость обработки. Центр координат всегда помещается в центре дуги. Осями координат плоскость обработки делится на квадранты I–IV.

В одном кадре может быть запрограммирована только дуга, целиком находящаяся в каком-либо одном квадранте. Если дуга окружности расположена в нескольких (например, в двух) квадрантах, то при программировании она разбивается на участки, лежащие только в одном квадранте. Для каждого участка отводится отдельный кадр программы. Плоскость обработки указывается командами (G17, G18, G19) и сохраняется до тех пор пока не будет названа другая. Любые иные команды G не влияют на заданную плоскость обработки. Если круговая интерполяция осуществляется только в одной плоскости, она может быть задана в начале программы. Например, дуга $B_1 - B_3$ (рис. 4.3) разбивается на участки $B_1 - B_2$ и $B_2 - B_3$.

Участок круговой интерполяции задается кадром, который включает: а) соответствующую G-функцию (G02, G03), если она не была запрограммирована перед этим; б) параметры перемещения по координатам X, Y, Z ; в) параметры круговой интерполяции I, J, K, которые тождественны абсолютным величинам координат начальных точек дуг относительно центра окружности. Например, для дуги $B_3 B_4$ при движении по часовой стрелке $J = |Y'_3|$; $K = |Z'_4|$. При движении против часовой стрелки $J = |Y'_3|$; $K = |Z'_3|$. Знаки параметров I, J, K системой ЧПУ не воспринимаются, при программировании рекомендуется присваивать им знак +. Если один из параметров I, J, K равен нулю, то он в программе не указывается.

Для примера рассмотрим программирование круговой интерполяции участка $B_1 - B_4$, координаты опорных точек которого приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Координаты опорных точек, мм	Система координат
$B_1 (-120; +90)$	YZ
$B_2 (0; +150)$	YZ
$B_3 (+80; +130)$	YZ
$B_3 (-100; -70)$	$Y'Z'$
$B_4 (-20; -120)$	$Y'Z'$

При обработке траектории от точки B_1 к точке B_4 программа записывается следующим образом:

N041	G02	Y + 012000	Z + 006000	J + 012000	K + 009000
N042		Y + 008000	Z - 002000		K + 015000
N043	G03	Y + 008000	Z - 005000	J + 010000	K + 007000

При обработке траектории от точки B_4 к точке B_1 программа выглядит так:

N612	G02	Y - 008000	Z + 005000	J + 002000	K + 012000
N613	G03	Y - 008000	Z + 002000	J + 008000	K + 013000
N614		Y - 012000	Z - 006000		K + 015000

Скорость подачи задается словом, состоящим из адреса F и следующих за ним четырех цифр:

1) первая цифра 0 (автоматическое определение необходимости разгона и торможения) или 4 (торможение в конце кадра до фиксированной величины (240 мм/мин) и разгон в следующем кадре до прежней скорости в случае отсутствия в нем кода подачи); 2) вторая цифра — показатель степени числа 10, который на 3 больше, чем количество разрядов в целой части величины скорости подачи; 3) третья и четвертая цифры — мантисса этой величины.

Покажем, как задается скорость подачи:

при F0310 величина подачи $0,10 \cdot 10^{3-3} = 0,1$ мм/мин;

при F0465 $0,65 \cdot 10^{4-3} = 6,5$ мм/мин;

при F0525 $0,25 \cdot 10^{5-3} = 25$ мм/мин;

при F0640 $0,40 \cdot 10^{6-3} = 400$ мм/мин.

Рассмотрим технологические команды: S10 (включение шпинделя) и S20 (отключение шпинделя).

При технологической команде должна указываться величина подачи. Если технологическая команда стоит между кадрами, где программируются геометрические перемещения с указанием значения подачи, то при технологической команде должна быть задана величина подачи, равная или меньшая записанной в следующем кадре. Например, необходимо задать команду "включение шпинделя". Это осуществляется следующим образом: S10 F0000, т.е. здесь задана нулевая подача. Конец программы программируется кодом M02.

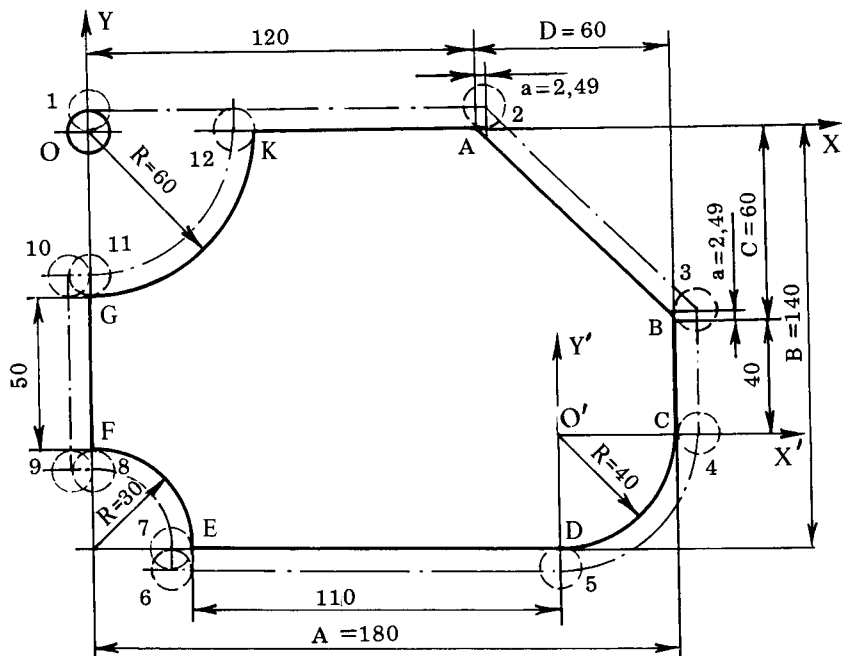


Рис. 4.4. Эскиз детали при фрезерной обработке.

Пример 4.1. Составить программу для обработки детали на фрезерном станке с ЧПУ (режущий инструмент – фреза диаметром 12 мм):

- 1) вычерчиваем эскиз детали (рис. 4.4);
- 2) выбираем точку начала координат – точку 0;
- 3) выбираем плоскость обработки детали. Принимаем, что деталь обрабатывается в плоскости XY . Из нулевой точки проводим оси координат;
- 4) намечаем на эскизе детали опорные точки (A, B, C, D, E, F, G, K) – точки, в которых происходит изменение траектории обработки, рассчитываем приращения координат;
- 5) расчет программы производится в приращениях.

В нулевую точку устанавливается центр фрезы. Из точки 0 по прямой перемещаемся в точку 1 (здесь и далее цифрами обозначены точки перемещения центра фрезы) на расстояние, равное радиусу фрезы (в данном случае на 6 мм). Расчет перемещений сводим в табл. 4.2, в которой указываем тип перемещения (по прямой, по окружности), координаты начальной точки (в данном случае точки 0), координаты конечной точки (точки 1), приращения координат конечной точки относительно начальной точки.

Из точки 1 по прямой перемещаемся в точку 2 в положительном направлении вдоль оси OX на расстоянии $120 \text{ мм} + a$, где a – отрезок, на который смещается центр фрезы относительно опорной точки A . Этот отрезок определяется по выражению $a = R_{\phi} \cdot \tan 22^{\circ} 30'$.
Для данного примера: $a = 6 \tan 22^{\circ} 30' = 2,49 \text{ мм}$; $120 + a = 120 + 2,49 = 122,49 \text{ мм}$.

Перемещение фрезы из точки 2 в точку 3 производится одновременно по двум координатам. Координаты точки 3 по оси OX (см. рис. 4.4) $X_K = 120 + D + R_{\phi} = 120 + 60 + 6 = 186 \text{ мм}$, $X_K = +186 \text{ мм}$; по оси OY $Y_K = C - a = 60 - 2,49 = 57,51 \text{ мм}$, $Y_K = -57,51 \text{ мм}$. Знак “-” показывает, что перемещение происходит в отрицательном направлении оси OY .

Таблица 4.2

Тип перемещения	Переход между точками	Координаты точки				Приращения	
		начальной		конечной		$\Delta x = X_K - X_H$	$\Delta y = Y_K - Y_H$
		X_H	Y_H	X_K	Y_K		
Прямая	0-1	0	0	0	+6	0	+6
— " —	1-2	0	+6	+122,49	+6	+122,49	0
— " —	2-3	+122,49	+6	+186	-57,51	+63,51	-63,51
— " —	3-4	+186	-57,51	+186	-100	0	-42,49
Окружность	4-5	+186	-100	+140	-146	-46	-46
Прямая	5-6	+140	-146	+24	-146	-116	0
— " —	6-7	+24	-146	+24	-140	0	+6
Окружность	7-8	+24	-140	0	-116	-24	+24
Прямая	8-9	0	-116	-6	-116	-6	0
— " —	9-10	-6	-116	-6	-54	0	+62
— " —	10-11	-6	-54	0	-54	+6	0
Окружность	11-12	0	-54	+54	0	+54	+54
Прямая	12-0	+54	0	0	0	-54	0

Перемещение из точки 3 в точку 4 по прямой вдоль оси OY . Координата точки 4 по оси OY : $Y_K = -(C + 40) = -100$ мм, $Y_K = -100$ мм.

Перемещение из точки 4 в точку 5 производится по дуге окружности. Начало координат при программировании дуги всегда находится в центре окружности, т.е. используется местная система координат. Координаты начальной точки дуги относительно центра дуги обозначаются следующим образом: I — координата X , J — координата Y . Для точки 4 относительно центра O' имеем $I = (40 + R_\Phi) = 40 + 6 = 46$ мм, $J = +46$ мм, $J = 0$. Для точки 5 $I = 0$, $J = -46$ мм.

Перемещение из точки 5 в точку 6 по прямой происходит вдоль оси OX в отрицательном направлении. Переходим снова к основной системе координат. Точка 5 имеет координаты $X_H = 120 + 60 - 40 = 140$ мм, $Y_H = -(B + R_\Phi) = -(140 + 6,0) = -146$ мм. Координаты точки 6 $X_K = 30 - R_\Phi = 30 - 6 = 24$ мм, $Y_K = -146$. Вычисление координат остальных опорных точек производится аналогично. Результаты расчета перемещений центра фрезы приведены в табл. 4.2.

Поскольку траектория движения фрезы представляет собой замкнутую линию (из конечной точки вновь возвращается в начальную), сумма всех приращений координат по осям должна быть равна нулю.

На основании данных табл. 4.2 составляем программу для обработки детали (табл. 4.3). Начальный и конечный участки перфоленты с записанной на ней программой приведены на рис. 4.5.

4.2. МАШИННАЯ ПОДГОТОВКА УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ

Бурное развитие числового программного управления оборудованием в значительной степени связано с разработкой методов и систем автоматизированной подготовки (САП) УП с помощью ЭВМ.

Ручная подготовка УП (см. § 4.1) состоит из следующих этапов:

1) разработки маршрутной технологии (определить, какие операции и на каких станках необходимо произвести, чтобы исходная заготовка приняла

Переход	Программа обработки	Кодируемая информация
---------	---------------------	-----------------------

	% LF	Начало программы
	N001 G17 LF	Задание плоскости обработки: обработка в плоскости XY
	N002 S10 F0000 LF	Включение шпинделя, подача нулевая
0-1	N003 G01 Y + 000600 F 0610 LF	Линейная интерполяция, перемещение по оси Y на 6 мм в положительном направлении, подача 100 мм/мин
1-2	N004 X + 012249 F 0640 LF	Перемещение вдоль оси X на 122,49 мм в положительном направлении, подача 400 мм/мин
2-3	N005 X + 006351 Y - 006351 LF	Одновременное перемещение по двум осям: вдоль оси X (на +63,51 мм), вдоль оси Y (на -63,51 мм)
3-4	N006 Y - 004249 LF	Перемещение вдоль оси Y (на -42,49 мм)
4-5	N007 G02 X - 004600 Y - 004600 I + 004600 LF	Круговая интерполяция, перемещение по часовой стрелке, координаты начальной точки дуги относительно центра дуги X = +46 мм, Y = 0, приращение координат конечной точки дуги относительно координат начальной точки дуги X = Y = -46 мм
5-6	N008 G01 X - 041600 LF	Линейная интерполяция, перемещение вдоль оси X на 116 мм в отрицательном направлении
6-7	N009 Y + 00600 LF	Перемещение вдоль оси Y на 6 мм в положительном направлении
7-8	N010 G03 X - 002400 Y + 002400 I + 002400 LF	Круговая интерполяция, перемещение против часовой стрелки, координаты начальной точки дуги относительно центра дуги X = 24 мм, Y = 0, приращение координат конечной точки дуги относительно координат начальной точки дуги X = -24 мм, Y = +24 мм
8-9	N011 G01 X - 000600 LF	Линейная интерполяция перемещения вдоль оси X на 6 мм
9-10	N012 Y + 006200 LF	Перемещение вдоль оси Y на 62 мм в положительном направлении
10-11	N013 X + 000600 LF	Перемещение вдоль оси X на 6 мм в положительном направлении
11-12	N014 G03 X + 005400 Y + 005400 J + 005400 LF	Круговая интерполяция, перемещение против часовой стрелки, координаты начальной точки дуги относительно центра дуги X = 0, Y = -54 мм, приращение координат конечной точки дуги относительно начальной точки дуги X = Y = +54 мм
12-0	N015 G01 X - 005400 LF	Линейная интерполяция, перемещение вдоль оси X на -54 мм
	N016 S20 F0000 LF	Стоп шпинделя
	N017 M02 LF	Конец программы

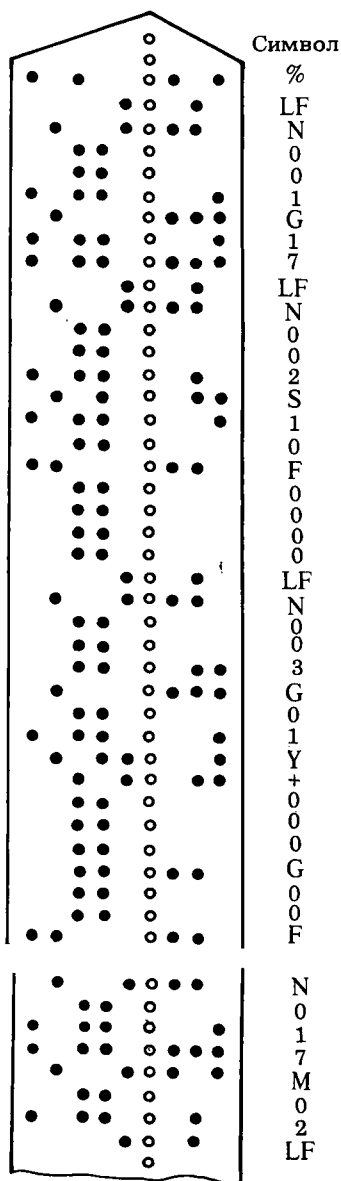


Рис. 4.5. Перфолента с записью программы.

черты готовой детали с учетом требуемого качества); 2) разработки технологии обработки (установить виды переходов, инструментов, режимы резания при обработке каждым инструментом); 3) обработки геометрической информации, в результате которой находится траектория движения каждого инструмента. Здесь должны учитываться возможности системы ЧПУ, т.е. виды интерполяции, которые можно осуществить; 4) записи УП в символах принятого кода; 5) записи УП на программноноситель; 6) контроля, отладки и редактирования УП.

Если все названные этапы выполняются с помощью ЭВМ, то можно говорить о полной автоматизации подготовки УП. Однако и в этом случае переходы от этапа к этапу реализуются технологом-программистом путем разработки соответствующего математического обеспечения (МО).

САП решает технологические и геометрические задачи, необходимые для подготовки УП обработки деталей.

С помощью ЭВМ решаются, например, такие геометрические задачи: вычисление координат опорных точек обрабатываемых контуров; аппроксимация криволинейных поверхностей, реализация которых невозможна имеющимися в системе ЧПУ интерполяторами; расчет параметров эквидистант; учет износа инструмента и т.д.

Отдельные модули МО объединяются в системы, предназначенные для различных технологических групп станков. Необходимость подразделения САП по технологическим признакам вызвана существенными различиями процессов обработки на токарных, фрезерно-расточных, шлифовальных и других станках. Существующие отечественные и зарубежные САП различаются по технологическому назначению, области применения, видам задач, решаемых с помощью ЭВМ, типу применяемой ЭВМ (универсальные или специализированные).

При разработке МО для САП решаются следующие задачи: 1) выбор входного языка для описания типовых траекторий. Входной язык должен охватывать все возможное многообразие траекторий при минимальном и наиболее естественном словарном наборе; 2) разработка алгоритмов преобразования



Рис. 4.6. Структура САП.

геометрической информации, представленной на входном языке, в формы, пригодные для записи их на алгоритмических или машинных языках; 3) алгоритмизация решений типовых математических задач по отработке заданных траекторий; 4) разработка алгоритмов, учитывающих возможности конкретных технических средств.

МО САП выполняется в виде нескольких программ и строится по структуре препроцессор-процессор-постпроцессор (рис. 4.6).

Препроцессор осуществляет перевод исходных данных с языка САП на машинный. *Процессор* решает общие геометрические (геометрический процессор) и технологические (технологический процессор) задачи. *Постпроцессор* разрабатывают для конкретных типов комбинации "станок-система управления" или в обобщенном виде для ряда станков.

Таким образом, процесс расчета управляющей программы включает два этапа — подготовку программы общего назначения (процессор) и программы специального назначения (постпроцессор). Наличие такой дополнительной программы характерно для универсальных систем (АРТ, ADAPT, NELNC, EXART и др.).

Постпроцессор выполняет следующие типовые функции: 1) считывание информации, подготовленной процессором; 2) перевод ее в координатную

систему конкретного станка; 3) проверку ограничений на станке (длина хода узлов, допустимые скорости подач и шпинделя и др.); 4) выдачу величин подач и скоростей шпинделя; 5) выдачу команд на перемещения с учетом допустимых величин ускорения при разгоне и торможении и цены импульса системы; 6) выбор способа интерполяции (линейная, круговая); 7) подготовку программноносителя (бумажная или магнитная лента и др.); 8) распечатку таблицы выходных данных в помощь технологу-программисту; 9) диагностику и распечатку ошибок.

4.3. ЯЗЫКИ САП

Основой любой САП является ее входной язык. Языки программирования разрабатываются для решения различных производственных задач. Последние можно систематизировать следующим образом: 1) ЧПУ станками; 2) управление роботами; 3) управление производственными процессами; 4) обработка информации в АСУП.

Родоначальником технологических языков высокого уровня является язык АРТ (Automatically Programmed Tools), предназначенный для пятикоординатной контурной обработки. Язык АРТ предложен Технологическим исследовательским институтом в Чикаго. Вследствие большой универсальности АРТ получил международное признание.

Программа на языке АРТ состоит из фраз английского языка и включает операторы четырех типов: 1) геометрическое описание конфигурации заготовок; 2) задания движения обрабатывающего инструмента вдоль обрабатываемой поверхности; 3) управления выполнением отдельных функций станка (изменение скорости шпинделя, реверс и т.д.); 4) специальные директивы, облегчающие программирование алгоритмов обработки (циклы, подпрограммы) и управляющие процессом трансляции.

Схема подготовки АРТ-программы приведена на рис. 4.7.

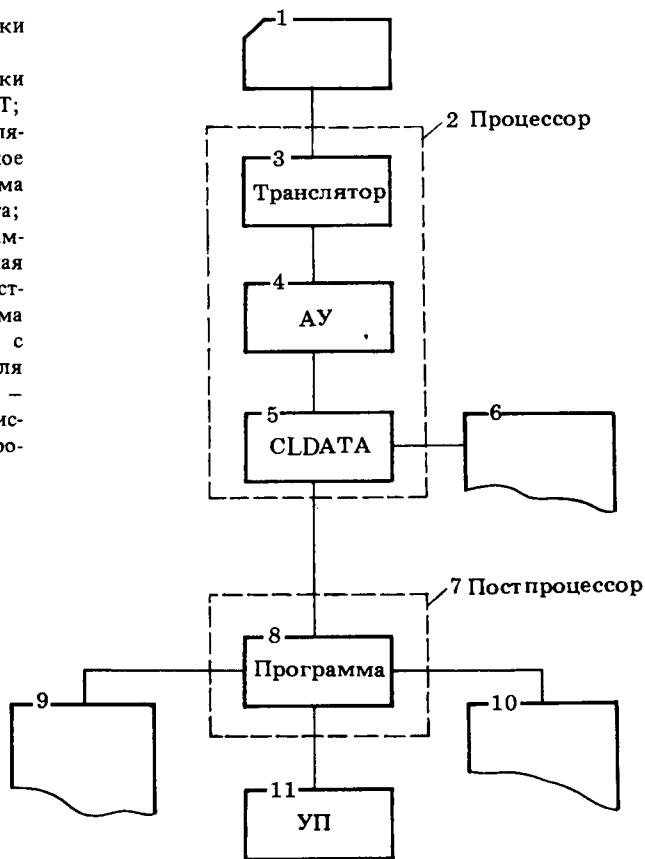
Процессор служит для преобразования исходной программы обработки заготовки в программу движения обрабатывающего инструмента. Транслятор преобразует полученное описание в последовательность машинных команд, выполняемых арифметическим устройством. В результате формируется массив, характеризующий положение обрабатываемого инструмента. Вывод МО на печать позволяет осуществлять контроль программы. На выходе процессора формируется программа, не зависящая от типа станка и устройства ЧПУ. Постпроцессор осуществляет адаптацию этой программы к конкретному устройству.

Однако система АРТ оказалась достаточно сложной в эксплуатации, требовала больших объемов памяти и программы процессора. Поэтому на базе АРТ было предложено несколько языков, пригодных для мини-ЭВМ. Система программирования на языке EXAPT была разработана в ФРГ. Общие черты EXAPT1 и EXAPT2 относятся также к языкам 2C, L и АРТ.

Язык EXAPT1 разработан для подготовки управляющих программ к сверлильным станкам и не требует специальных знаний о станке. Его основные особенности заключаются в следующем: 1) геометрия детали и процесс механической обработки описываются с помощью простых предложений свободно-го формата; 2) размеры задаются так, как они указаны на чертеже; 3) можно

Рис. 4.7. Схема подготовки АРТ-программы:

1 — программа обработки заготовки на языке АРТ; 2 — процессор; 3 — транслятор; 4 — арифметическое устройство; 5 — программа перемещения инструмента; 6 — протокол для программиста (сопроводительная документация); 7 — пост-процессор; 8 — программа для конкретного станка с ЧПУ; 9 — протокол для организации файла; 10 — протокол для программиста; 11 — управляющая программа.



задавать положение группы точек, расположенных на прямой, окружности, что особенно важно для сверлильных станков; 4) технологические параметры обработки (режущий инструмент, скорости шпинделя, последовательность операций и др.) автоматически задаются процессором на основании конкретных параметров оборудования. Технологический процесс, данные о станке, инструменте, материале заготовки вводятся в ЭВМ, которая определяет режимы резания, траекторию, выбирает инструменты.

Алфавит языка EXART1 составляют латинские заглавные буквы, десятичные цифры (1, 2, ..., 0) и специальные символы. Знак дроби "/" используется для разделения предложения на главную и второстепенную части. Главная часть предложения (ключевое слово) записывается слева от знака дроби. Справа от знака помещается второстепенная часть, которая может состоять из модификаторов и (или) чисел. Второстепенная часть предложения делится с помощью запятой на модификаторы и (или) числа.

Идентификаторы помещаются в скобках для того, чтобы показать, что они являются полностью законченными предложениями. Например, GOTO/(POINT/12,5,7). Знак равенства "=" используется для отделения пере-

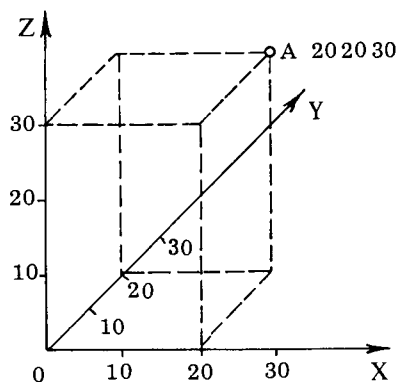


Рис. 4.8. Определение точки.

менных величин от слова, к которому они относятся. Например, $P17 = \text{POINT}/12,5,7$.

Элементами языка являются слова, числа и синтаксические символы. Слова состоят из букв и цифр. Слово начинается с буквы. Максимальное число знаков в слове 6. Различают два типа слов: слова языкового набора и символы. Слова языкового набора имеют определенное значение и составляют словарный запас, которым должен пользоваться программист. Символы выбираются свободно и не должны совпадать со словами языкового набора. Они применяются для того, чтобы дать название какому-либо предложению, а затем к нему обращаться.

Предложения состоят из слов, чисел и синтаксических элементов. Предложение включает основную часть и вспомогательную (если это необходимо). Эти части разделяются знаком дроби. Последовательность предложений составляет программу.

Положение точки на станке определяется в системе координат X, Y, Z . Ось Z направлена параллельно оси инструмента. Связь между координатными системами станка и детали задается предложением

$\text{TRANS}/x, y, z,$

где x, y, z — координаты нулевой точки (начала отсчета) координатной системы детали в координатной системе станка.

Для определения отдельных точек и групп точек используется информация о плоскости Z в виде такого предложения:

$\text{ZSURF}/z,$

где z — координата по оси Z , определенная в плоскости, параллельной плоскости $X-Y$, и расположенная на расстоянии z от нее.

Отдельная точка (рис. 4.8) определяется предложением

символ = $\text{POINT}/x, y, z,$

где x, y, z — координаты точки.

Для определения положения группы точек применяются прямые линии.

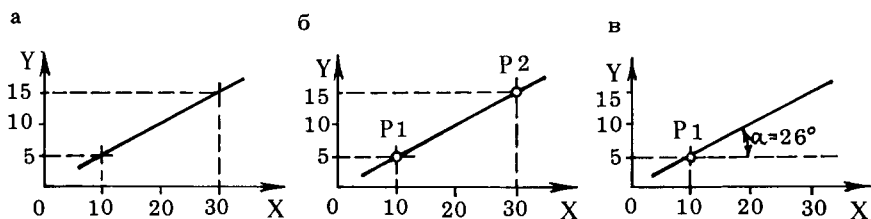


Рис. 4.9. Определение прямой линии:

для а $L1 = \text{LINE}/10,5; 30,15$; для б $P1 = \text{POINT}/10,5; P2 = \text{POINT}/30,15; L1 = \text{LINE}/P1, P2$; для в $P1 = \text{POINT}/10,5; L1 = \text{LINE}/P1, \text{ATANGL}26$.

Прямые линии определяются следующими предложениями:

символ = $\text{LINE}/x_1, y_1; x_2, y_2$,

где x_1, y_1 — координаты первой точки; x_2, y_2 — координаты второй точки.

Другие варианты определения линии (рис. 4.9):

символ = $\text{LINE}/P1, P2$,

где $P1, P2$ — символы точек;

символ = $\text{LINE}/P1, \text{ATANGL}, a$,

где $P1$ — символ точки; a — значение угла между линией и осью X .

Окружности служат для определения положения точек, расположенных на них. Окружность задается предложениями (рис. 4.10):

символ = $\text{CIRCLE}/x, y, r$,

где x, y — координаты центра окружности; r — радиус окружности;

символ = $\text{CIRCLE}/\text{CENTER}, P1, \text{RADIUS}, r$,

где $P1$ — символ точки, являющейся центром окружности.

Язык позволяет задавать группу точек, расположенных в определенном порядке на прямой линии (на равных и разных расстояниях) и на окружности (на равных и разных расстояниях).

Для технологических определений в языке EXAPT1 имеются предложения, описывающие деталь и процесс механической обработки, который выполняется в координатах, заданных предложениями геометрических определений. Язык предусматривает возможность автоматически выбирать параметры и режимы резания, которые обычно представляются в виде анкет.

Для описания технологических операций можно использовать: а) индивидуальное программирование движения инструмента с предложениями для подачи и скорости резания; б) отдельные операции; в) циклы обработки; г) последовательные операции.

При задании перемещения исполнительного органа в плоскости XYZ конкретная траектория не устанавливается. Координаты вводятся с помощью предложения FROM. Текст предложения

FROM/ x, y, z .

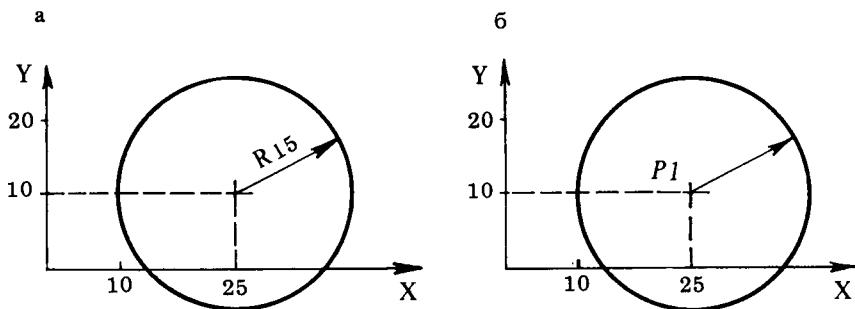


Рис. 4.10. Определение окружности:

для а $C1 = \text{CIRCLE}/25, 10, 15$; для б $P1 = \text{POINT}/25, 10$; $C1 = \text{CIRCLE}/\text{CENTER}, P1$; $\text{RADIUS}, 15$.

Перемещение в конкретную точку задается предложением

`GOTO/x, y, z.`

Если требуется обойти препятствие при перемещении из одной точки в другую, используется модификатор `AVOID`.

Отдельные данные могут оформляться в виде подпрограммы. Подпрограмма — это полностью завершенная часть программы, обозначенная символом (без индекса). Подпрограмма хранится в ЗУ и вызывается при появлении ее символа в программе обработки детали. Вызов может производиться многократно.

Определение подпрограммы производится предложением

`символ = MACRO /fp1, fp2` или `символ = MACRO,`

где `fp1, fp2` — параметры подпрограммы.

Завершение подпрограммы определяется предложением `TERMAC`. Все фразы между предложениями `MACRO` и `TERMAC` запоминаются и хранятся в виде подпрограммы.

Язык `EXAPT2` применяется для программирования работы токарных станков с позиционными и контурными системами ЧПУ.

Для фрезерной двухкоординатной контурной обработки на базе языка `APT` разработана подсистема `2C, L`. Сокращают программу, используя специальные функции, каждая из которых является подпрограммой. Процессор системы `2C, L` предусматривает применение универсальных ЭВМ со стандартным периферийным оборудованием. В качестве программных языков приняты `ФОРТРАН 4` и `АЛГОЛ`. Программа обработки данных в процессоре, записанная на магнитной ленте, барабане или диске, затем передается в постпроцессор. Эти данные названы `CLDATA` (`Cutter Locations DATA` — информация о положении инструмента). Программист практически на любой стадии может обеспечить дополнительный вывод промежуточных данных программы.

Специально для сверлильных станков разработана подсистема `2P, L`, которая отвечает требованиям позиционной обработки.

В отечественной промышленности для фрезерной обработки нашли приме-

Фраза	Оператор		Пояснение
	1	2	
1			3
01	ПРОГРАММА $\hookrightarrow$ ОБРАЗЕЦ $\hookrightarrow$ ПРОГРАММЫ НА ЯЗЫКЕ САПС;		Начальная строка программы. Здесь же дается название программы
02	ДЕТАЛЬ УЧЕБНАЯ;		Здесь можно написать наименование детали, ее номер и т.д.
03	СОСТАВИЛ: СИДОРОВ В.Г.;		
04	ТОЧ1 : = 100.0,0,0.0; ПР5 : 0,1, 0;		Точке 1 (ТОЧ1) присвоены координаты $X = 100.0, Y = 0.0, Z = 0.0$. Второй оператор присваивает наименование ПР5 оси ОХ
05	ПР3: = ПР1, ПР5, РАСТ, 135. 75, УБ; ПР1: = ТОЧ1		Определена прямая ПР3, параллельная ПР5, отстоящая от нее на расстоянии 135. 75, причем выше прямой ПР5(УБ) – итрек больше)
06	ПР2: = ПР1, ПР3, РАСТ, 524.25, УБ;		См. фразу 05
07	ТОЧ2: = 590.0, 660.0;		См. фразу 04
08	ПР4: = ПР1, ПР5, РАСТ, 560.0, УБ;		Определена прямая ПР4 (см. фразу 05)
09	ТОЧ4: = 1000.0, 475.0;		См. фразу 04
10	ОКР2: = ЦТР, ТОЧ4, РАД310;		Окружность 2 (ОКР2) задана координатами центра в точке 4 (ТОЧ4) и радиусом (РАД) 310 мм
11	ТОЧ3: = ПРС, ПР4, ОКР2, ХМ;		Точка ТОЧ3 находится на пересечении (ПРС) прямой ПР4 с окружностью ОКР2. Поскольку таких точек может быть две, берется та из них, у которой координата Х меньше (ХМ)
12	ОКР1: = ЧЕРЕЗ, ТОЧ2, ТОЧ3, РАД400.0, ХМ;		Заданная окружность проходит через (ЧЕРЕЗ) две точки (ТОЧ2 и ТОЧ3), имеет радиус (РАД) 400 мм. Из двух возможных окружностей берется та, координата центра которой Х меньше (ХМ)
13	ОКР3 = 800.0, 243.0, 150. 0;		Здесь показан другой вариант задания окружности: заданием координат центра ($X = 800; Y = 243$) и величины радиуса $R = 150$ мм
14	ТОЧ7: = ПРС, ПР1, ПР3;		Точка 7 находится как точка пересечения (ПРС) двух прямых ПР1 и ПР3
15	СТАНОК/10, ИНТЕРП/6; ФРЕЗА/50.0;		Здесь указаны условный номер станка (10), условный номер системы управления (6), применяемый инструмент (ФРЕЗА) диаметром 50 мм

1	2	3
16	ПОДАЧА/3000;	Указана ускоренная подача 3000 мм/мин; команда действует до отменяющего ее указания
17	ИЗ/ТОЧ1; ВНАПР/ТОЧ7; ИДИ/ЗА; ПР/1;	Дается команда начать движение из точки 1 в направлении точки 7 и перейти за прямую 1
18	ПОДАЧА/150, ФРСЛ, ДОП/0.02, 0.02;	Задается рабочая подача 150 мм/мин, указываются местоположение фрезы относительно обрабатываемой поверхности (ФРСЛ – фреза слева), допуск на аппроксимацию дуг окружности $\pm 0,02$ мм
19	ИДИ/ПР1, ЗАПР2, ИДИ/ПР2, ВПРАВ, ЗА ОКР1;	Обработка на указанной в фрезе 18 подаче вдоль прямой 1 (ПР1), за прямую 2, затем вдоль прямой 2 вправо, за окружность 1
20	ИДИ/ОКР1, ПОЧС, ОКР2, ПРЧС, ОКР3, ПОЧС, ДО, ПРС2, ПР3	Обработка вдоль окружности 1 по часовой стрелке (ПОЧС), вдоль окружности 2 против часовой стрелки (ПРЧС), вдоль окружности 3 по часовой стрелке до второго пересечения (ПРС2) с прямой 3
21	ИДИ/ПР3, ДО, ТОЧ7	Обработка с прежней подачей вдоль прямой 3 до точки 7
22	ПОДАЧА 3000	Указана ускоренная подача
23	ИДИ/ТОЧ1	Отход в точку 1 с указанной в фразе 22 подачей
24	КОНЕЦ	Конец программы

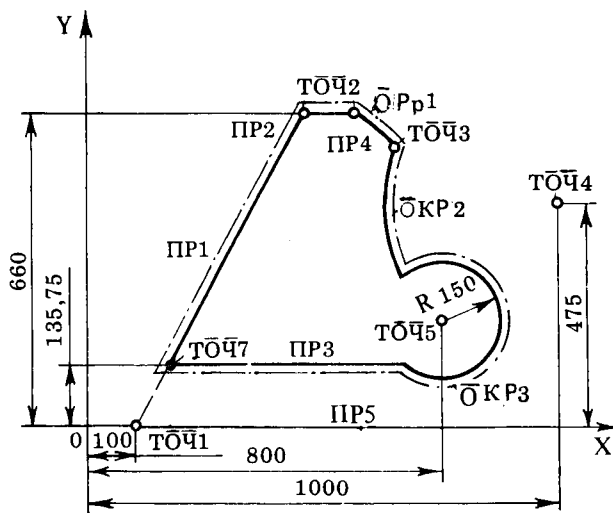


Рис. 4.11. Подготовка программы на языке САПС.

нение системы САП-2, САПС-M22, СППС. Рассмотрим запись исходной информации на языке САПС-M22 (табл. 4.4). Язык позволяет записывать точки, прямые, дуги окружности. Для отделения слов и чисел используют запятую, с помощью точки целая часть числа отделяется от дробной. В качестве оператора присваивания применяется обозначение ":=". Для того чтобы различать буквы от похожих на них цифр, над буквами ставится черта ($\bar{O}$, $\bar{C}$, $\bar{Z}$).

В табл. 4.4 дан пример составления программы для обработки детали, изображенной на рис. 4.11. Как видно, процесс программирования значительно упрощается по сравнению с ручным. Так, использование автоматизированных систем позволяет сократить трудоемкость подготовки УП в 15–20 раз.

4.4. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Для программирования роботов необходимо задать в трехмерном пространстве требуемую траекторию движения точки на руке манипулятора, характеризующей положение схвата, либо закрепленного в нем технологического инструмента.

В настоящее время известны следующие виды программирования: аналитическое (текстовое); обучением (Play-back); ручное (teach-in); речевым методом. Сравнительные показатели первых двух методов представлены в табл. 4.5. При *речевом методе* ввода информации система обучается распознаванию произносимых будущим пользователем робота ключевых слов и чисел.

Наиболее простым является программирование *обучением*. Основная идея способа заключается в организации с помощью оператора однократного образцового выполнения технологической операции с одновременной записью в ЗУ сигналов, характеризующих текущие значения координат звеньев манипулятора. Программирование обучением явилось результатом роботизации операций

Таблица 4.5

Критерий сравнения методов	Метод программирования					
	обучением		аналитический			
			явный	с моделью	Обучение	внешней среды
Ввод данных о движении	Запоминание при движении	С элементами обучения	Аналитический	Задание схвата робота	Расчетный	
Средства геометрического описания	Задание траекторий	Задание позиций	Задание позиций	Задание позиций	Описание объекта с учетом взаимодействия	Описание объекта с аналитическим описанием связей
Средства описания задачи	Непосредственное кодирование	Расширенный язык ЧПУ	Машинный язык	Язык высокого уровня	Программирование на естественном языке	
Характеристика разработанной программы	В реальном времени	Автономная	Автономная	В реальном времени	Автономная	Автономная
Обработка задания	Декодер	Интерпретатор	Интерпретатор	Компилятор	Компилятор	Интерпретатор
Программная документация	Познание считывание на дисплее	Дисплей-распечатка				

окраски и обработки поверхности. Инструмент, например краскопульт, устанавливается в захвате манипулятора, перемещаемом оператором в соответствии с требуемым циклом движений. При этом последовательность текущих значений координат по каждой из степеней подвижности звеньев манипулятора запоминается; таким образом в ЗУ могут быть записаны тысячи точек, определяющих траекторию движения. Такой способ обычно используется при контурном управлении, где требуется точное воспроизведение траектории — сварка, окраска пульверизатором, шлифовка, снятие облоя и т.д.

Напомним, что подобная система была реализована еще в 30-е гг. при программировании обработки на токарном станке, когда движения суппорта, управляемого опытным токарем, записывались на программноносителе — МЛ одновременно с процессом резания.

При использовании метода обучения возникают определенные требования к конструкции робота: приводы манипуляторов должны допускать свободные перемещения выходных валов. Оператор должен иметь высокую квалификацию в области выполнения технологических операций, но от него не требуется знаний в программировании и вычислительной технике.

К достоинствам метода относится возможность учитывать особенности мастерства оператора, которые трудно описать аналитическим путем. При перемещении схвата в соответствии с требуемой траекторией учитываются возможные зазоры в кинематических узлах манипулятора, упругие свойства элементов его кинематики, что сделать практически невозможно при аналитическом задании программы. Перемещая схват в процессе обучения, оператор может учесть возможные изменения внешней среды, например подвижность детали, находящейся на конвейере. Удачным может быть сочетание такого робота с системой технического зрения (СТЗ), которая применяется для распознавания силуэтов или других отличительных признаков различных деталей по мере их появления в рабочей зоне робота. С помощью программы распознается деталь, определяются ее координаты и вызывается из памяти соответствующая подпрограмма движений манипулятора. При использовании ПР требуется программировать последовательность движений, переводящих схват манипулятора в строго определенные позиции в пространстве. При этом траектория движения при переходе из одной точки в другую может быть произвольной.

При *ручном программировании* управление звеньями манипулятора осуществляется оператором с помощью задающей рукоятки или кнопочного пульта. Сигналы задающего устройства в режиме ручного управления проходят по каналу ввод-управление и обрабатываются приводами. Одновременно с обработкой перемещений производится запись в ЗУ данных о состоянии датчиков обратных связей. При использовании данного способа не предъявляется особых требований к конструкции манипулятора и его приводов.

Приращенные координаты по каждой из степеней свободы определяются путем подсчета числа импульсов унитарного кода за фиксированный интервал времени T_n . Эти приращения координат записываются в память, а затем переносятся на программноносителе в форме БЦК в виде кадров с постоянной длительностью последующего воспроизведения, равной $m_i T_n$. Масштаб времени m_i , обычно принимаемый меньше единицы, необходим потому, что обучение,

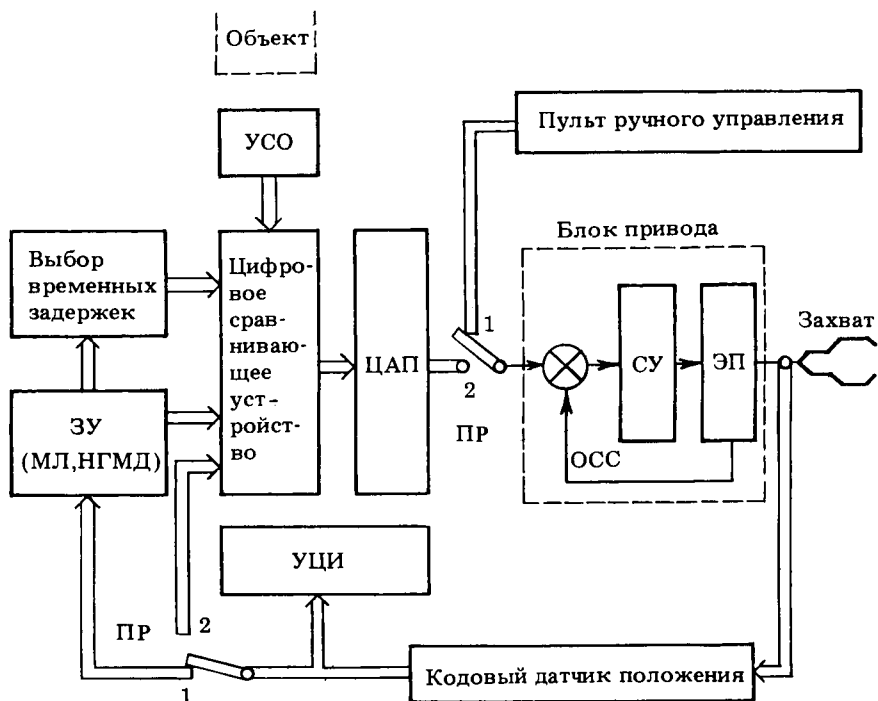


Рис. 4.12. Схема обучения работы.

как правило, выполняется в замедленном темпе. Помимо приращений координат, в кадре может быть информация о включении или выключении механизмов манипулятора, времени перехода от одного шага программы к другому, значении скорости перемещения, усилия захвата и т.д.

Рассмотрим схему централизованного обучения с записью программы в ОЗУ (рис. 4.12). Система управления приводом руки манипулятора работает в двух режимах: 1) при обучении, когда ее координаты устанавливаются оператором; 2) при автоматическом воспроизведении записанной программы.

При обучении (переключатель режимов (ПР) в положении 1) рука перемещается в любое положение с помощью переключателя пульта ручного управления. При этом сигналы кодового датчика положения, соответствующие текущему положению руки, записываются в ЗУ на магнитной ленте или диске. Кодовое значение требуемой координаты руки записывается нажатием кнопки на пульте управления. Перемещение захвата изображается с помощью устройства цифровой индикации (УЦИ). Так как в настоящее время широко распространены комплектные электроприводы с аналоговыми системами управления, на рис. 4.12 показан цифроаналоговый преобразователь. При прямом цифровом управлении электроприводом надобность в этом преобразователе отпадает.

При воспроизведении (ПР в положении 2) управление движением осуществляется позиционным устройством ЧПУ в соответствии с командами на

выходе блока памяти, где записаны координаты звеньев манипулятора для каждой заданной позиции. В ЗУ записываются также команды управления захватом, скоростью движения, временными задержками при переходе к очередному шагу программы, а также команды передачи и считывания сигналов, поступающих от обслуживаемого объекта. Переход к следующему циклу программы производится при совпадении заданного и отработанного кодов положения и окончании времени задержки перехода.

Недостатки методов ручного программирования и программирования обучением заключаются в следующем: 1) программирование может оказаться слишком трудоемким для ряда операций. Так, операции сборки, сортировки, сварочные операции (например, сварка кузовов автомобилей) требуют обучения позиционированию в сотнях точек, что в свою очередь связано со значительными затратами времени квалифицированного персонала; 2) зависимость процесса обучения, а в последующем и производительности и точности работы робота от квалификации оператора; 3) процесс обучения происходит непосредственно с участием самого робота, который на это время исключается из производственного цикла; 4) жесткость сформированной программы делает невозможным оперативное ее изменение в условиях эксплуатации — для этого требуется переобучение робота (например, в условиях ГАП, где используются сотни роботов, невозможно произвести их переобучение во время переналадки производства, т.е. теряется смысл гибкости); 5) невозможность использования информации сенсорных датчиков; 6) сложность контроля программы.

Несмотря на перечисленные недостатки, около 90 % роботов, используемых в настоящее время в промышленности, программируются одним из приведенных методов.

4.5. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Аналитический метод программирования основан на определении координат опорных точек траектории движения схвата в пространстве. Символическое описание операций и данных задается в форме последовательности чисел. Простейшей единицей программной информации является число, которое соответствует элементарной операции, выполняемой роботом. Как и при ЧПУ станками, назовем это число словом. Такими операциями являются открытие — закрытие захвата, перемещение одного звена манипулятора, останов обработки движения на определенное время, выдача сигналов на объект управления. Разрядность числа операции зависит от ее характера. Например, для операции "включить — выключить" достаточно одного бита, позиционирование в заданные координаты занимает 10—15 бит.

Группа слов, характеризующих несколько элементарных операций и имеющих законченный характер, составляет содержание кадра. В свою очередь кадры могут объединяться в подпрограмму, определяющую законченную, часто повторяющуюся последовательность движений робота.

Манипулятор в отличие от станка с ЧПУ обладает подвижностью (маневренностью) суставов, что позволяет схвату достигать одной и той же точки при различном положении звеньев, т.е. при различных характеристических координатах по каждой из степеней подвижности.

Положение схвата в пространстве задается шестимерным вектором $C = (x_c, y_c, z_c, \theta_1, \theta_2, \theta_3)$, где x_c, y_c, z_c – координаты конца схвата; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – углы наклона, характеризующие положение элементов кинематики манипулятора.

При определении опорных точек возникает проблема, заключающаяся в том, что оператор должен точно описать последующую точку траектории с помощью координат системы. Это в свою очередь требует точной оценки пространственной траектории, что весьма трудоемко.

В зависимости от условий внешней среды различают аналитическое программирование явное и с использованием модели внешней среды. При явном аналитическом программировании все данные о кинематическом и динамическом состоянии робота и окружающего пространства формулируются программистом в явном виде.

В случае аналитического программирования с использованием модели внешней среды система программирования имеет модель окружающего пространства, которая содержит сведения о положении и ориентировании объектов, их геометрии, взаимосвязях. По мере необходимости эта информация вызывается операционной системой. Наличие модели окружающего пространства дает возможность пользователю выполнять преимущественно проблемно-ориентированное программирование без постоянного обращения к геометрическому состоянию робота.

Пример 4.2. Взять болт, перенести через корпус детали и вставить в отверстие.

Приведем команды, которые подаются при явном аналитическом программировании: 1) проверить, свободна ли рука; 2) если нет, то перенести объект на позицию СКЛАД; 3) быстро переместить захват к позиции БОЛТ; 4) медленно опустить захват на 30 мм; 5) включить захват; 6) медленно поднять захват на 30 мм; 7) переместить захват в промежуточную позицию; 8) переместить захват через корпус; 9) опустить захват на 50 мм; 10) позиции БОЛТ присвоить новое значение ОТВЕРСТИЕ; 11) открыть захват; 12) поднять захват на 50 мм.

Команда при программировании с учетом модели внешней среды следующая: вставить БОЛТ в ОТВЕРСТИЕ.

В обоих случаях сначала необходимо распознать позиции БОЛТ, КОРПУС и ОТВЕРСТИЕ. Во втором случае задается лишь функция и цель операции, а система (решающее логическое устройство) самостоятельно осуществляет стратегию управления. Здесь мы подходим к понятию искусственного интеллекта, вопросы которого интенсивно разрабатываются в настоящее время.

В целом аналитическое программирование представляет собой более комплексное и потому более гибкое решение проблемы программирования. Можно выделить следующие особенности аналитического программирования: 1) возможность коррекции программы на любой стадии ее подготовки или отладки; 2) коррекция модели окружающего пространства в реальном времени с помощью эффективного объединения сенсорных систем, дифференцирования реакции на случайно возникающие изменения состояния процесса или на аварийную ситуацию; 3) подготовка программ производится в автономном режиме (off-line), т.е. использование производственных мощностей производится более рационально; 4) наличие удобной программной документации; 5) возможность моделирования технологического процесса и отладки программы с помощью модели.

Система аналитического программирования робота включает язык пользователя, на котором составляется программа, и исполнительную систему, функционирующую в реальном времени и обеспечивающую выполнение написанной программы после ее трансляции. Отдельные системы объединяются в централизованную структуру, т.е. в интегрированный пакет математического обеспечения, содержащий компилирующую программу, интерпретирующую программу, системы взаимодействия с внешней средой, программу тестов и имитирующую программу.

Несмотря на значительную сложность аналитического программирования, ожидается, что доля использования аналитического программирования к 1990 г. возрастет до 28 %.

4.6. ЯЗЫКИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

При разработке языков для аналитического программирования промышленных роботов возможны два пути: 1) разработать новый (специфический для роботов) язык программирования; 2) приспособить один из существующих языков (более высокого уровня). Разработчики языков программирования ПР испытывают влияние языков для микроЭВМ, с одной стороны, и языков систем ЧПУ, с другой.

Перечислим наиболее часто применяемые языки программирования ПР:

АЛГОЛ (ALGOL – Algorithmic Language),
ПЛ/1 (PL/1 – Programming Language),
ФОРТРАН (FORTRAN – Formula Translation),
БЕЙСИК (BASIC – Beginners All Purpose Instruction Code),
РТЛ/2 (RTL/2 – Real Time Language),
АПТ (APT – Automatically Programmed Tools),
АЛ (AL – Assembly Language),
АВТОПАСС (AUTOPASS – Automated Parts Assembly System),
МАЛ (MAL – Multipurpose Assembly Language),
РАПТ (RAPT – Robot Automatically Programmed Tools),
ВАЛ (VAL),
СИГЛА (SIGLA – Sigma Language),
АЛЬФА (ALFA – A Language For Automation),
ЛАМА (LAMA – Language for Automatic Mechanical Assembly),
РОКОЛ (ROCOL – Robot Control Language),
АДА (ADA).

К языкам, разработанным специально для робототехники, относятся ВАЛ, СИГЛА и др. Сравнительная оценка некоторых языков программирования ПР дана в табл. 4.6. Приведенные данные характеризуют возможности описания геометрии движения посредством элементов языка; задания по описанию положения объектов относительно друг друга; параметры для описания внешней среды; подпрограммы, процедуры и задачи. Только два языка содержат почти все приведенные команды: АЛ и АВТОПАСС. У многих языков отсутствуют команды арифметических операций. Можно привести следующее укрупненное разделение языков по классам: 1) языки со специфическими свойствами для роботов (АЛ, АВТОПАСС, АЛЬФА, МАЛ, ВАЛ); 2) языки с наличием арифметических операций (МЛ, ВАЛ, МАЛ, РТЛ/2); 3) наиболее простой язык (СИГЛА).

Характеристика языка	АЛ	АВТОПАСС	АЛЬФА	МАЛ	МЛ	РАПТ	СИГЛА	ВАЛ
Оператор:								
движений	+	+	+	+	+	+	+	+
с заданием позиций	+	+		+	+	+	+	+
с заданием точек		+				+		
с вводом данных от чувствительных элементов	+				+			
с вводом данных по времени	+		+					+
с заданием скорости	+							+
с командой слежения			+					
Геометрическое описание:								
положения	+	+				+		
объекта	+					+		
Арифметические операции +, -, /, ×	+	+		+	+			+
Контроль хода	+	+	+	+	+		+	+

Характерной чертой языка РАПТ является возможность представления большой по объему геометрической информации. Это свойство язык РАПТ унаследовал от языка АПТ, предназначенного для станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр". Приведем краткую характеристику некоторых языков.

Для описания манипуляционных задач разработан язык высокого уровня АЛ, который имеет блочную структуру. В противоположность АВТОПАССу он не располагает возможностью передачи геометрической формы объектов; описываются лишь точки рабочего пространства и относящиеся к ним координаты манипулятора (так называемый ФРАМ). В систему программирования входит транслятор, система для управления приводами манипулятора в реальном времени, системы для управления внешними устройствами.

По структуре язык АЛ похож на АЛГОЛ, имеет одинаковую структуру операторов, блоков, условных операторов и циклов; используются ограничители BEGIN и END. Основным оператором языка является команда ДВИЖЕНИЕ (MOVE), имеющая несколько модификаций. Например, команда MOVE действует до достижения какого-либо условия (длительность движения, достижение позиции, развиваемое усилие и др.).

По команде ИСКАТЬ (SEARCH) робот осуществляет спиралевидные движения в указанной плоскости; по команде ЦЕНТРИРОВАТЬ (CENTER) рука робота центрируется относительно объекта, находящегося между пальцами схвата; команда ПРЕСЕЧЬ (ABORT) обеспечивает останов исполнительных устройств и выдачу сигнала при возникновении непредвиденной ситуации; по команде РАБОТАТЬ (OPERATE) осуществляется управление заранее запрограммированными устройствами (координатным столом, электрической отверткой и т.п.). Для управления роботом в реальном времени программа

предварительно транслируется и лишь затем выдается на обработку. Это не позволяет использовать язык АЛ в диалоговом режиме. Транслятор языка реализован на ЭВМ PDP-10.

Основное назначение языка АЛ — сборочные операции. Данный язык широко использует сенсорную информацию.

Связь пользователя с системой осуществляется через супервизор — главную управляющую программу системы. Для связи пользователя с системой служат два терминала. Через первый терминал вводится задание; второй терминал служит для непосредственного управления процессом отладки программы манипулятора.

АВТОПАСС разработан фирмой IBM и относится к языкам семейства PL/1. В его основе заложена идея, согласно которой алгоритм выполнения операций должен быть по возможности близок тексту технологической карты. АВТОПАСС по сравнению с АЛ является более проблемно-ориентированным. К транслятору подключается устройство, которое корректирует указания оператора по своему алгоритму и вырабатывает управляющие команды. Процессор геометрических решений создает модель внешней среды, на основании чего транслятор рассчитывает бесконфликтный путь движения между отдельными рабочими точками, а также точками захвата и складирования.

Язык АЛЬФА имеет команду для вызова алгоритма следящей системы, которая вместе с датчиками обратной связи образует замкнутую систему управления. Каждой команде соответствует стандартная АЛЬФА-программа. Система программирования содержит обучающий модуль для ввода координат посредством указаний; модуль контроля для испытаний программы путем имитации; модуль исполнения; модуль вызова стандартных программ. Для реализации системы используется компьютер PDP-11/10 емкостью памяти 8 К слов.

Язык МЛ (фирма IBM) имеет простой синтаксис вида

< строка x > < код команды > < параметр >

Предусмотрен прием команд чувствительных элементов.

Язык МАЛ, разработанный фирмой Milan Polytechnic для программирования двурукого робота Olivetti SIGMA в декартовой системе координат, подобен языку БЕЙСИК и имеет развитые средства для синхронизации параллельного выполнения заданий. Система МАЛ состоит из двух частей: транслятора исходного языка в промежуточный код и интерпретатора промежуточного кода. Промежуточный код описывает взаимодействие иерархической микропроцессорной системы. Предусмотрена возможность обработки информации сенсорных устройств, осуществляемой отдельными микропроцессорами.

Язык РАПТ, как и язык АРТ, описывает объекты с помощью простых геометрических форм, таких, как линии, плоскости, поверхности. Описание движения может производиться без подробного указания координат, только путем задания геометрических соотношений (например, перенести БОЛТ вертикально через отверстие 1).

Язык РОКОЛ предназначен для обработки информации чувствительных датчиков. Алгоритм работы ПР разделен на две части: на основную, когда изменения во внешней среде не происходят, и корректирующую, когда проис-

ходят определенные изменения во внешней среде. Система программирования содержит интерпретатор языка, стандартную программу для контроля чувствительных датчиков, редактор и блок управления роботом. Система связана с устройством технического зрения, и для ее реализации используется вычислительный комплекс АСВТ М-6000.

Простым является язык СИГЛА, который восполняет пробел между программированием с использованием языков высокого уровня и ручным программированием. Все команды языка имеют вид: < буквы > < буквы > < численные параметры >. Пользователь выбирает команду из общего набора и может осуществить параллельное выполнение задач, причем программы синхронизируются с помощью общей памяти.

ВАЛ — простой специфический язык управления всеми роботами типа PUMA и Unimate серий 2000 и 4000. ВАЛ имеет структуру языка БЕИСИК с добавлением новых операторов для программирования роботов. Он имеет простой синтаксис; команды описывают движение робота, указывают позиции, контролируют состояние механизмов. Определение положения и ориентация робота проводятся путем обращения к символам и представляются оператору с помощью ротационной матрицы и вектора-преобразователя. Определение опорных точек осуществляется посредством обучения.

Основной концепцией языка ADA является понятие "объект", который характеризуется идентификатором и набором функций и процедур, обеспечивающих доступ к нему как к структуре данных. Второй особенностью языка ADA является конструкция "пакет", что позволяет ввести в один программный модуль логически связанные объекты.

Пакет содержит спецификацию и тело. В спецификации приводятся типы данных, переменные и процедуры, доступные пользователю. Определение основных функций пакета содержится в теле, и доступ к ним возможен лишь через описания раздела спецификаций.

Программная единица "задача" позволяет выделить в ADA-программе параллельные и синхронизирующиеся между собой фрагменты. Такая задача служит основой для организации работы в реальном времени и позволяет повысить эффективность реализации программ в многопроцессорной системе.

Язык ADA содержит большое количество процедурных вызовов. Подготовка ADA-программы начинается с выбора и спецификации объектов, которые объединяются в пакеты, легко доступные пользователю. Для роботизированной ячейки, состоящей из робота, системы технического зрения, интерфейса с базой данных САПР, определены объекты четырех типов: 1) ROBT — обеспечивает интерфейс с роботом; 2) POSITION — содержит набор структур данных для предоставления координат робота и обрабатываемой детали; 3) CAD-MODEL — обеспечивает доступ к базе данных САПР; 4) VISION — обеспечивает взаимодействие с подсистемой технического зрения.

Подсистема технического зрения позволяет проводить идентификацию перекрещивающихся деталей, расположенных на входном конвейере.

Модульная организация ADA-программы дает возможность в качестве исходных данных использовать информацию, полученную от реального объекта с помощью системы ТЗ или его программной модели. Изменение оборудования гибкого производства ячейки требует изменения только соответствующих структур данных.

Язык ADA может рассматриваться в качестве стандарта для языка программирования гибких производственных роботизированных ячеек.

Несмотря на очевидные преимущества метода аналитического программирования и обилие языков, его внедрение в промышленность происходит медленно. Сложившаяся практика разработки почти для каждого нового ПР собственного специализированного языка программирования противоречит современной концепции интегрированного производства. Это связано в первую очередь с имеющимися недостатками языков программирования, которые заключаются в следующем. ПР представляют собой автономные устройства. Языки программирования ПР пока не позволяют объединить их с САПР предприятия, чтобы имеющиеся в САПР базы данных могли быть использованы для программирования роботов. Каждый из аналитически программируемых роботов снабжается языковым процессором, что весьма расточительно — ведь процессор большую часть времени бездействует.

Разработанные языки ПР непонятны для других элементов ГАП предприятия, так как в них не предусмотрено описание технологического оборудования. Современное ГАП, как правило, имеет в своем составе роботы разных типов, оборудованные различными системами компьютеров. Имеющиеся языки ПР и программное обеспечение на их базе не могут быть использованы для различных роботов. Сложность представляет также проверка подготовленных программ. Существующая в настоящее время методика проверки основана на использовании графических устройств, что затруднено их высокой стоимостью. Определенной проблемой являются и невысокая точность самих роботов, сложность языков программирования.

Вместе с тем в настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию языков ПР. Основные направления работ можно сформулировать следующим образом. Необходимо создание системы моделирования внешней среды робота, что позволит ему самостоятельно программировать движения в соответствии с заданной конечной целью. Трудность здесь заключается в том, что введенная в компьютер модель внешней среды может не соответствовать действительности в процессе гибкой технологии. Кроме того, отдельные детали имеют очень сложную форму, и их описание само по себе является громоздким. Системы программирования нуждаются в развитой машинной графике, что позволит производить проверку программ на стадии разработки. Системы программирования должны легко адаптироваться к различным типам компьютеров, быть удобными как для пользователей, так и для разработчиков, легко усваиваться персоналом предприятия. Важную роль играет также унификация интерфейсов, средств отладки, возможность использования программ для других систем роботов, осуществления контроля и выявление ошибок на основе сенсорной информации в реальном времени. Системы управления роботов должны иметь возможность использовать внешние базы данных, допускать программирование на разных языках, иметь удобное описание траекторий и типов движения роботов.

5. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОЙ ИНФОРМАЦИИ

5.1. ИНТЕРПОЛЯТОРЫ

В системах ЧПУ РО механизмов перемещаются по опорным точкам траектории движения инструмента, изделия, схвата робота и др. Координаты опорных точек и их приращения определяются на основании чертежа детали. Движения между опорными точками задаются с помощью устройств, которые называются *интерполяторами*. В дальнейшем за интерполятор будем принимать устройство, на вход которого кадр за кадром подается информация в виде цифровых кодов, а на выходе выдается информация для каждой координаты в виде последовательности импульсов, т.е. в виде унитарного кода. Унитарный код по каждой координате подается непосредственно в систему управления приводом данной координаты.

Движение от одной опорной точки к другой может осуществляться по прямой или по кривой. В зависимости от этого интерполяторы могут быть *линейными* или *нелинейными*. По виду кривой различают нелинейные интерполяторы второго, третьего порядков и выше. Принципиально любая траектория может быть аппроксимирована кривой, задаваемой в виде полинома Лагранжа:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n.$$

Примерами нелинейных интерполяторов второго порядка являются круговые и параболические. При их применении участок траектории заменяется соответственно отрезком окружности или параболы. В практике ЧПУ наиболее широкое распространение получили линейно-круговые интерполяторы. Это вызвано тем, что в подавляющем большинстве контуры деталей машиностроения представляют собой отрезки прямых и дуги окружностей. Чем выше порядок кривой, тем сложнее устройство интерполятора, но зато при одной и той же точности упрощается программирование, так как требуется меньше расчетов по определению координат опорных точек.

По способу применения различают *автономные* и *встроенные* интерполяторы. В последнем случае интерполятор встраивается непосредственно в систему управления и работает в ее режиме. Это означает, что считывание и обработка информации производятся последовательно, кадр за кадром. После отработки предыдущего кадра программы в систему управления поступает следующий кадр и т.д. Уплотнение режима работы достигается тем, что интерполятор приступает к расшифровке последующего кадра программы до окончания отработки системой управления предыдущего кадра. Структура системы ЧПУ со встроенным интерполятором изображена на рис. 5.1, а, где обозначено БПр – блок программы, ИНТ – интерполятор, ДП – датчик положения, φ – обрабатываемая координата.

Интерполятор является весьма дорогим и сложным устройством системы ЧПУ. Наиболее полно он используется в автономной схеме (рис. 5.1, б).

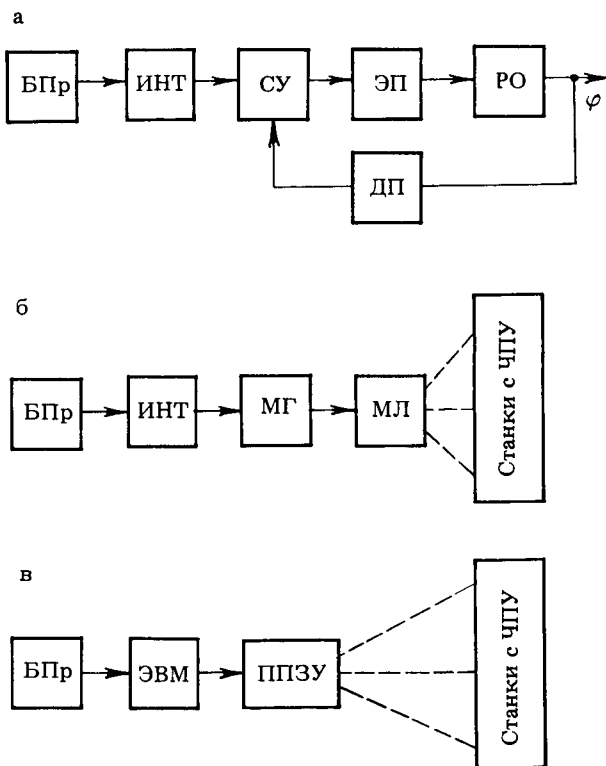


Рис. 5.1. Схемы использования интерполяторов.

При такой схеме один интерpolator может обслуживать несколько станков с ЧПУ и располагаться в другом цехе или даже на ином предприятии. Недостаточная гибкость схемы автономного использования интерполятора не позволила применять ее в широких масштабах. Внедрение микропроцессоров и микроЭВМ в системы ЧПУ привело к разработке аналогичной схемы, имеющей, однако, новое содержание (рис. 5.1, в). В данном случае ЭВМ готовит программы и хранит их в перепрограммируемом запоминающем устройстве (ППЗУ), откуда по запросам они поступают в системы ЧПУ станками.

В зависимости от вида вычислительных процедур и алгоритмов функционирования различают интерполяторы, реализующие принципы разложения пространственных функций на параметрические составляющие на основе решения алгебраических и дифференциальных уравнений.

По способу реализации следует выделить *аппаратное* исполнение интерполятора (на базе унифицированных узлов) и *программное* (на базе микроЭВМ и микропроцессоров). При линейной интерполяции в кадре указываются адрес G01 и координаты конечной точки участка. Координаты начальной точки являются координатами конечной точки предыдущего участка и уже известны. Круговая интерполяция также задается адресом G (G02 — круговая интерполяция по часовой стрелке, G03 — то же, против часовой стрелки). Алгоритмы

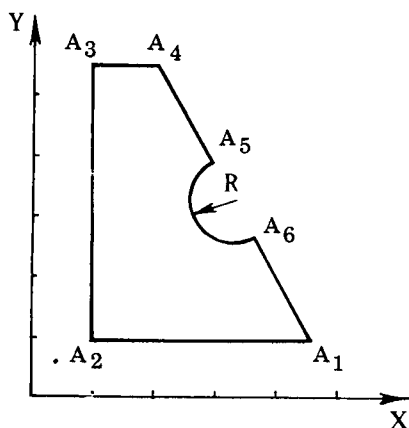


Рис. 5.2. Траектория движения инструмента.

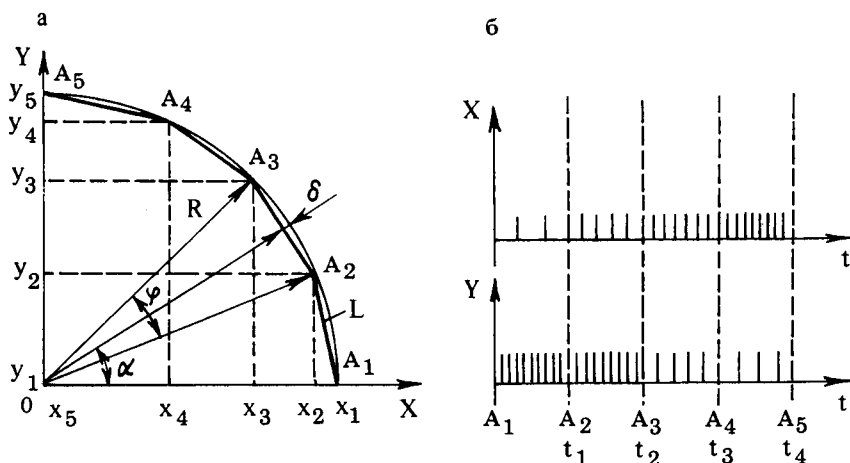


Рис. 5.3. Аппроксимация дуги окружности отрезками прямых (а) и последовательности импульсов на выходах линейного интерполятора (б).

интерполяции разделяются на две группы. К первой относятся алгоритмы, задачей которых является определение момента выдачи единичных приращений по координатам. Частота выдачи приращений зависит от скорости изменения координат. У алгоритмов второй группы период расчета текущих значений координат постоянен. В этой группе задачей является определение приращения координаты, накопленного за период расчета (квант времени). При его постоянстве приращения зависят от скорости изменения координат.

К первой группе относятся *методы оценочной функции* и *цифрового дифференциального анализатора*, ко второй — *метод цифрового интегрирования*.

В системе ЧПУ на базе ЭВМ широко применяется метод цифрового интегрирования. Независимо от принципа действия и реализации интерполятор моделирует в реальном масштабе времени движение изображающей точки по заданной траектории, которое воспроизводится следящими приводами станка или робота.

Исходным является чертеж детали, на основании которого технолог-программист определяет опорные точки. Движение между двумя соседними опорными точками производится по одному и тому же закону — по прямой линии, по окружности или по кривой более высокого порядка. Таким образом, для организации движения между двумя опорными точками необходим один кадр программы. Предположим, требуется смоделировать траекторию движения инструмента, изображенную на рис. 5.2. Между опорными точками A_1-A_2 движение производится вдоль оси X в отрицательном направлении, между точками A_2-A_3 — вдоль оси Y , между точками A_3-A_4 — вдоль оси X в положительном направлении, между точками A_4-A_5 и A_5-A_6 — по прямой линии с соответствующим наклоном, между точками A_5-A_6 — по дуге окружности.

Простейшим интерполятором является линейный. Принципиально сколь угодно сложную кривую можно аппроксимировать с помощью отрезков прямых.

Предположим, необходимо смоделировать дугу окружности A_1-A_5 , изображенную на рис. 5.3, а. Она может быть аппроксимирована отрезками прямых $A_1A_2, A_2A_3, \dots, A_4A_5$. Чем больше таких отрезков, тем лучше будет приближение к действительной кривой, т.е. тем меньше погрешность δ . Однако большее число отрезков означает более трудоемкое программирование; возрастает также объем программы и программноносителя. Поэтому ограничивающим фактором при аппроксимации является допустимая погрешность δ . При аппроксимации окружности N участками прямых центральный угол i -го участка найдем из соотношения

$$\alpha_i = \frac{\varphi}{2} + (i - 1) \varphi = \varphi \left(\frac{1}{2} + i - 1 \right) = \varphi \left(i - \frac{1}{2} \right), \quad (5.1)$$

где $\varphi = (\pi/2)/N = \pi/(2N)$ — приращение угла на участке аппроксимации.

Длина участка прямой L и погрешность δ (в первом приближении $\delta \ll R$) связаны соотношением

$$L = 2\sqrt{2R\delta}. \quad (5.2)$$

С другой стороны, $L = 2R \sin \varphi/2$, что позволяет с учетом (5.1) и (5.2) определить приращения координат в первом квадранте при известных L и φ :

$$\Delta x_i = L \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \left(i - \frac{1}{2} \right) \right); \quad (5.3)$$

$$\Delta y_i = L \sin \left(-\frac{\pi}{2} - \varphi \left(i - \frac{1}{2} \right) \right). \quad (5.4)$$

Скорость движения на траектории v_i определяется требованиями технологии. Цикл работы интерполятора, т.е. время отработки кадра

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2} / v_i. \quad (5.5)$$

Тогда скорость движения по координатам найдем из (5.3)–(5.5):

$$v_{xi} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} = \frac{\Delta x_i}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}} v_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta k_i} v_i ;$$

$$v_{yi} = \frac{\Delta y_i}{\Delta t_i} = \frac{\Delta y_i}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}} v_i = \frac{\Delta y_i}{\Delta k_i} v_i .$$

За время i -го цикла по координате X должно быть выдано $N_{xi} = \Delta x_i / h$ импульсов с частотой

$$f_{xi} = \frac{N_{xi}}{\Delta t_i} = \frac{\Delta x_i v_i}{h \Delta k_i} ,$$

а по координате Y с частотой

$$f_{yi} = \frac{\Delta y_i v_i}{h \Delta k_i} ,$$

где h — цена деления импульса.

Обычно приращения координат подаются на вход интерполятора в двоичном коде, что позволяет записать

$$\frac{f_{xi}}{f_{yi}} = \frac{a_{n,x} 2^n + a_{n-1,x} 2^{n-1} + \dots + a_{1,x} 2^1 + a_{0,x} 2^0}{a_{n,y} 2^n + a_{n-1,y} 2^{n-1} + \dots + a_{1,y} 2^1 + a_{0,y} 2^0} = \frac{K_x}{K_y} , \quad (5.6)$$

где $a_{0,x}, a_{1,x}, \dots, a_{0,y}, a_{1,y}, \dots$ — коэффициенты разрядов кодов, принимающие значения 0 и 1; K_x, K_y — коды перемещений по осям.

Из (5.6) следует, что для воспроизведения отрезка прямой достаточно, чтобы отношение частот следования импульсов унитарных кодов по координатам было равно отношению соответствующих приращений координат. Этот вывод справедлив и для пространственной линейной аппроксимации. Скорость воспроизведения интерполируемого участка траектории определяется абсолютным значением частот следования импульсов на выходах интерполятора:

$$f_{xi} = f_g (a_{n,x} 2^n + a_{n-1,x} 2^{n-1} + \dots + a_{0,x} 2^0),$$

$$f_{yi} = f_g (a_{n,y} 2^n + a_{n-1,y} 2^{n-1} + \dots + a_{0,y} 2^0),$$

$$f_{zi} = f_g (a_{n,z} 2^n + a_{n-1,z} 2^{n-1} + \dots + a_{0,z} 2^0),$$

$$f_g = N v_i / \Delta L_i = N v_i / \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} ,$$

где f_g — частота генератора; N — количество импульсов.

На рис. 5.3, б приведена последовательность импульсов унитарного кода на выходах интерполятора, обеспечивающих движение изображающей точки по заданной траектории со скоростью $v_i = \text{const}, i = 1, \dots, 4$.

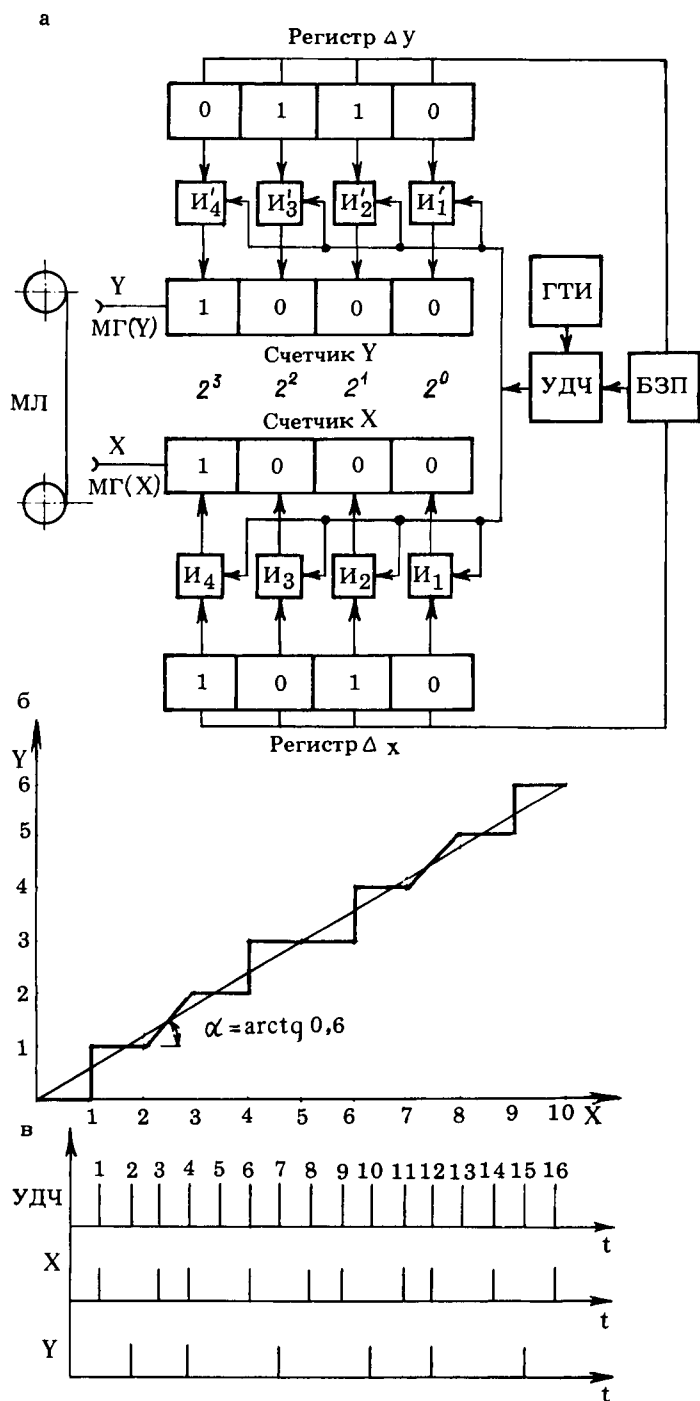


Рис. 5.4. Упрощенная схема линейного интерполатора (а), траектория рабочего органа (б) и распределение импульсов по координатам X и Y (в).

Линейный интерполятор может рассматриваться как преобразователь числового кода в унитарный. Упрощенная схема линейного интерполятора изображена на рис. 5.4, а. Из блока задания программы (БЗП) информация о приращениях по координатам в заданном кадре программы в двоичном коде поступает в соответствующие регистры Δx и Δy , а о скорости перемещения — на управляемый делитель частоты (УДЧ). В свою очередь УДЧ соединен с генератором тактовых импульсов (ГТИ), работающим с постоянной частотой. Регистр Δx соединен со счетчиком X через вентили $I_1, \dots, I_4$, которые представляют собой схемы совпадения. Аналогичным образом выполнена часть схемы, относящаяся к оси Y . Количество разрядов n в регистрах и счетчиках определяется максимальным приращением координат и может быть найдено из формулы

$$n \geq \frac{\lg(N_{\max} + 1)}{\lg 2},$$

где $N_{\max}$ — максимальное число, которое должно быть записано в регистре. На схеме, представленной на рис. 5.4, для упрощения изображено четыре разряда. Работу линейного интерполятора рассмотрим на примере.

Пример 5.1. Пусть приращения координат в кадре составляют $\Delta x = X_2 - X_1 = 1$ мм, $\Delta y = Y_2 - Y_1 = 0,6$ мм. При цене одного импульса (дискретности системы) $h = 0,1$ мм/имп величины приращений в элементарных шагах составят $\Delta x = 10$, $\Delta y = 6$ или в двоичном коде $\Delta x = 1010$, $\Delta y = 0110$. Эти числа вводятся в регистры Δx и Δy . В счетчики X и Y для ускорения процесса счета введены постоянные числа, равные машинной единице 1000. Производя вычисления, можно убедиться, что ее наличие сказывается лишь на скорости счета. Интерполятор будет работать и в случае, если в счетчиках первоначальное число будет 0000, однако при этом для движения от одной опорной точки к другой потребуется большее число импульсов от ГТИ. От УДЧ сигналы поступают на схемы совпадения $I_1 - I_4$ и $I'_1 - I'_4$. Другие входы этих схем соединены с соответствующими разрядами регистров Δx и Δy . Таким образом, импульсы от УДЧ проходят в счетчик только тогда, когда на обоих входах схем совпадения имеется 1. Другими словами, при поступлении каждого тактового импульса от УДЧ к числу, имеющемуся в счетчике, добавляется число, записанное в соответствующем регистре, т.е. в счетчик X добавляется величина $\Delta x = 1010$, а в счетчик Y добавляется $\Delta y = 0110$.

При переполнении счетчиков появляются импульсы, подаваемые на выход интерполятора. Они могут быть использованы в схеме управления станком непосредственно или записаны на магнитную ленту МЛ с помощью магнитных головок (МГ) X и Y . Для рассматриваемого примера состояние элементов схемы интерполятора приведено в табл. 5.1. Информация, записанная в колонках "сигнал X " и "сигнал Y ", является программой перемещения РО станка, записанной в унитарном коде.

Окончание процесса счета фиксируется по количеству выходных импульсов. К этому времени по оси X должно быть выдано 10 импульсов, а по оси Y — 6.

График движения РО, соответствующий полученной программе, приведен на рис. 5.4, б. Естественно, что угол наклона аппроксимирующей прямой должен быть равен заданному: $\alpha = \arctg(\Delta y / \Delta x) = \arctg 0,6$. Для фиксации окончания процесса интерполирования интерполяторы обычно снабжаются (на схеме не показано) дополнительными регистрами Δx и Δy , из которых вычитаются сигналы по соответствующим осям. Когда в обоих дополнительных регистрах образуется 0, интерполяция на данном участке заканчивается, и схема переходит к интерполяции следующего участка.

Номер тактового импульса	Координата X		Координата Y	
	состояние счетчика	сигнал X	состояние счетчика	сигнал X
0	1000	0	1000	0
1	0010	1	1110	0
2	1100	0	0100	1
3	0110	1	1010	0
4	0000	1	0000	1
5	1010	0	0110	0
6	0100	1	1100	0
7	1110	0	0010	1
8	1000	1	1000	0
9	0010	1	1110	0
10	1100	0	0100	1
11	0110	1	1010	0
12	0000	1	0000	1
13	1010	0	0110	0
14	0100	1	1100	0
15	1110	0	0010	1
16	1000	1	1000	0

Выходные импульсы интерполятора по осям X и Y приведены на рис. 5.4, в (там же показаны импульсы УДЧ, поступающие на вход интерполятора).

5.2. ЛИНЕЙНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ПО МЕТОДУ ОЦЕНОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Метод оценочной функции (МОФ), при котором моделируется алгебраическое уравнение воспроизводимой кривой, широко используется в современных устройствах ЧПУ.

Покажем применение МОФ для воспроизведения линейного участка траектории рабочего органа. Для этого запишем уравнение отрезка прямой в виде

$$y_i \Delta x = x_i \Delta y,$$

где x_i, y_i — координаты промежуточной точки траектории; $\Delta x, \Delta y$ — заданные в кадре приращения.

Оценочную функцию i -й точки траектории F_i определим в виде

$$F_i = y_i \Delta x - x_i \Delta y. \quad (5.7)$$

Из (5.7) видно, что если точка, отображающая заданную траекторию, отвечает уравнению прямой, то $F_i = 0$. Таким образом, заданная прямая делит плоскость на две полуплоскости, в одной из которых оценочная функция F_i положительна, а в другой отрицательна. В этих полуплоскостях точка находится соответственно выше и ниже заданной прямой. На этом основан алгоритм

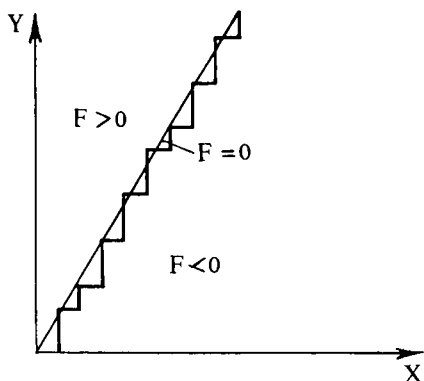


Рис. 5.5. Линейная интерполяция по методу оценочной функции (элементарные приращения соответствуют одному движению по осям координат).

оценочной функции, при котором с определенной частотой, задаваемой блоком задания скорости, анализируется знак оценочной функции. В зависимости от этого знака выдается сигнал приращения по одной из координат. Масштаб приращений выбирается так, что единица приращения соответствует единице младшего разряда слова системы ЧПУ.

Начало воспроизводимого участка прямой условно совмещается с началом координат. Движение рабочего органа при линейной интерполяции по МОФ показано на рис. 5.5. Определив, что $F_i \geq 0$, выдают один управляющий импульс в направлении координаты X и вновь определяют знак оценочной функции. Если определено $F_i < 0$, то выдается один импульс для движения в направлении координаты Y . Заметим, что всякий раз после подачи управляющего импульса заново определяется знак оценочной функции. Если после очередного импульса он не изменился, то движение продолжается в том же направлении. Составим выражение для определения очередного значения оценочной функции F_{i+1} через ее предыдущее значение F_i . После единичного шага по оси X ($F_i \geq 0$) получим

$$F_{i+1} = y_i \Delta x - (x_i + 1) \Delta y = y_i \Delta x - x_i \Delta y - \Delta y = F_i - \Delta y. \quad (5.8)$$

После единичного шага по оси Y ($F_i < 0$) запишем

$$F_{i+1} = (y_i + 1) \Delta x - x_i \Delta y = y_i \Delta x - x_i \Delta y + \Delta x = F_i + \Delta x. \quad (5.9)$$

На этом принципе (см. (5.8), (5.9)) строится структура линейного интерполятора по МОФ (рис. 5.6).

Из блока задания программы информация о величинах приращений координат поступает в регистры Δx и Δy , а о величине скорости подачи — в блок задания скорости (БЗС), который может быть построен по принципу управляемого делителя частоты. В регистре F_i хранится текущее значение оценочной функции.

Допустим, что по дискриминатору знак F_i отрицательный. В этом случае импульс, поступающий от БЗС, будет направлен в привод подачи по оси Y , уменьшит содержимое регистра Δy на единицу для определения момента

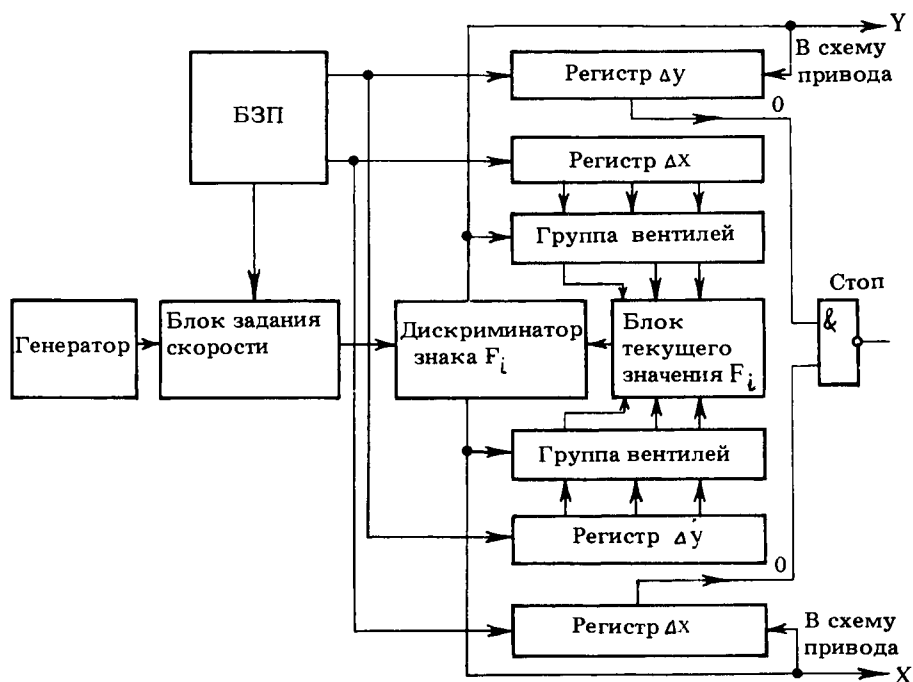


Рис. 5.6. Функциональная схема линейного интерполатора по методу оценочной функции.

окончания интерполяции; этот же импульс откроет группу вентилей, благодаря чему содержимое регистра ΔX добавится к текущему значению F_i , сформировав новое значение оценочной функции F_{i+1} согласно (5.9). Если же знак оценочной функции положительный, то аналогичным образом работает нижняя половина схемы. После отработки перемещений в регистрах Δx и Δy образуются логические нули и формируется команда СТОП. Рассмотренный алгоритм МОФ отличается простотой, но имеет недостаток – в нем отсутствует управление одновременно по обеим координатам, что приводит к большой затрате управляющих импульсов и, следовательно, времени интерполяции.

Алгоритм линейной интерполяции по методу оценочной функции может быть усовершенствован путем выдачи приращения по максимальной координате на каждом кванте времени (рис. 5.7). Максимальной может быть любая из координат $X, Y, Z, \dots$. Ход алгоритма, таким образом, зависит от того, по какой из координат задано максимальное приращение. Для того чтобы уменьшить разнообразие алгоритмов управления, целесообразно перейти от реальных координат объекта $X, Y, Z, \dots$ к абстрактным координатам $\alpha, \beta, \gamma, \dots$, причем максимальную координату всегда обозначают через α . Это обозначение вводится при интерпретации кадра; обратная операция, т.е. переход от координат $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ к координатам $X, Y, Z, \dots$, осуществляется на выходе системы.

Максимальную координату α будем откладывать по оси абсцисс. Тогда

при положительном значении оценочной функции ($F_i \geq 0$) осуществляем приращение по оси α , а при $F_i < 0$ — одновременно по обеим координатам α и β . В этом случае выражение (5.8) сохраняется. При $F_i > 0$ $\alpha_{i+1} = \alpha_i + 1$; $F_{i+1} = F_i - \Delta\beta$, а при $F_i \leq 0$ получим $F_{i+1} = F_i + \Delta\alpha - \Delta\beta$, $\alpha_{i+1} = \alpha_i + 1$; $\beta_{i+1} = \beta_i + 1$.

Работу алгоритмов линейной интерполяции рассмотрим на примере. Зададимся приращениями в кадре в машинных единицах $\Delta\alpha = 10$, $\Delta\beta = 6$. Результаты расчета алгоритмов приведены в табл. 5.2, а траектория движения

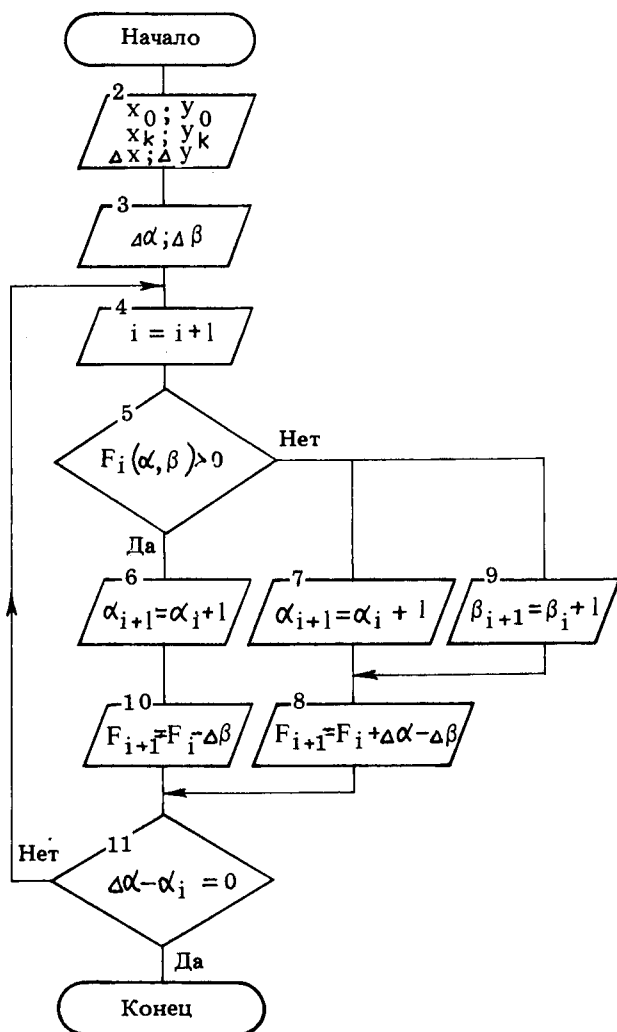


Рис. 5.7. Усовершенствованный алгоритм линейной интерполяции по методу оценочной функции.

Номер кван- та	Обычный				Алгоритм				Усовершенствованный			
	шаг по осям		текущее зна- чение		значение оценочной функции F_i		шаг по осям		текущее зна- чение		значение оценочной функ- ции F_i	
	α	β	α_i	β_i			α	β	α_i	β_i		
0	0	0	0	0	$F_0 = 0$		0	0	0	0	$F_0 = 0$	
1	1	0	1	0	$F_1 = 0 - 6 = -6$		1	0	1	0	$F_1 = 0 - 6 = -6$	
2	0	1	1	1	$F_2 = -6 + 10 = +4$		1	1	2	1	$F_2 = -6 + 10 - 6 = -2$	
3	1	0	2	1	$F_3 = +4 - 6 = -2$		1	1	3	2	$F_3 = -2 + 10 - 6 = +2$	
4	0	1	2	2	$F_4 = -2 + 10 = +8$		1	0	4	2	$F_4 = +2 - 6 = -4$	
5	1	0	3	2	$F_5 = +8 - 6 = +2$		1	1	5	3	$F_5 = -4 + 10 - 6 = 0$	
6	1	0	4	2	$F_6 = +2 - 6 = -4$		1	0	6	3	$F_6 = 0 - 6 = -6$	
7	0	1	4	3	$F_7 = -4 + 10 = +6$		1	1	7	4	$F_7 = -6 + 10 - 6 = -2$	
8	1	0	5	3	$F_8 = +6 - 6 = 0$		1	1	8	5	$F_8 = -2 + 10 - 6 = +2$	
9	1	0	6	3	$F_9 = 0 - 6 = -6$		1	0	9	5	$F_9 = +2 - 6 = -4$	
10	0	1	6	4	$F_{10} = -6 + 10 = +4$		1	1	10	6	$F_{10} = -4 + 10 - 6 = 0$	
11	1	0	7	4	$F_{11} = +4 - 6 = -2$							
12	0	1	7	5	$F_{12} = -2 + 10 = +8$							
13	1	0	8	5	$F_{13} = +8 - 6 = +2$							
14	1	0	9	5	$F_{14} = +2 - 6 = -4$							
15	0	1	9	6	$F_{15} = -4 + 10 = +6$							
16	1	0	10	6	$F_{16} = +6 - 6 = 0$							

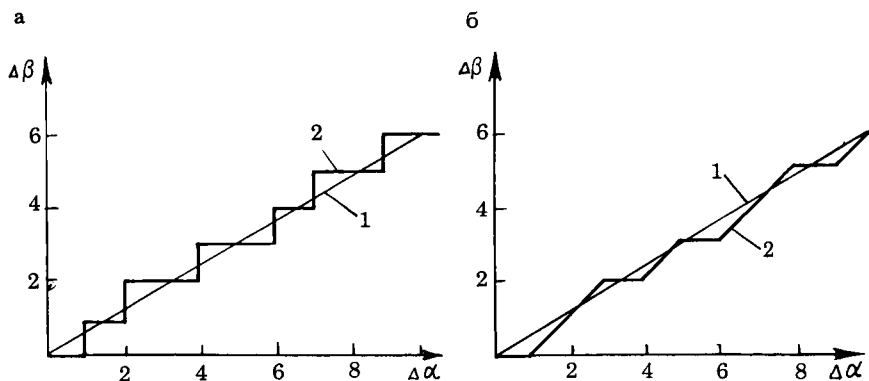


Рис. 5.8. Линейная интерполяция по методу оценочной функции для обычного алгоритма (а) и усовершенствованного (б):
1 — заданная траектория; 2 — фактическая.

построена на рис. 5.8. Как видно, усовершенствованный алгоритм эффективнее. В данном примере требуется 10 шагов вместо 16 при использовании обычного алгоритма. При обработке траектории прямой под углом 45° скорость движения максимально может вырасти в 2 раза. Контроль окончания обработки кадра можно вести лишь по максимальной координате. Максимальная скорость подачи вдоль одной координатной оси $v_{n \max} = h/T_{\pi}$, где h — значение единичного шага (дискретность подачи); T_{π} — время реализации алгоритма подачи.

Максимальная контурная скорость зависит от числа одновременно работающих координат K : $v_{k \max} = (h/T_{\pi}) \sqrt{K}$ и имеет наибольшее значение, когда приращения равны.

Оценку быстродействия системы ЧПУ, работающей по методу оценочной функции, дают в виде максимальной частоты выходных импульсов на привод по одной координате: $f_{\max} = 1/T_{\pi}$. Необходимая частота f выдачи сигналов управления (шагов) определяется заданной скоростью подачи v_n и углами наклона траектории к осям координат

$$f = \frac{1}{h} \frac{v \Delta \alpha}{\sqrt{\Delta \alpha^2 + \Delta \beta^2 + \Delta \gamma^2 + \dots}},$$

где $\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma$ — приращения координат.

Подготовка исходных данных для линейной интерполяции по методу оценочной функции производится в следующем порядке: 1) определяются приращения в кадре по осям $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, в соответствии с которыми назначаются обобщенные координаты α, β, γ , причем максимальной координате присваивается наименование α ; 2) определяется частота шагов интерполяции.

5.3. КРУГОВАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ПО МЕТОДУ ОЦЕНОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Применение метода оценочной функции при круговой интерполяции осуществляется в том же порядке, что и при линейной интерполяции (см.(5.7)). Уравнение окружности запишем в форме

$$x_i^2 + y_i^2 = R^2. \quad (5.10)$$

Оценочной функцией F_i для окружности (см. (5.10)) является выражение

$$F_i = x_i^2 + y_i^2 - R^2, \quad (5.11)$$

где x_i, y_i — текущие значения координат траектории; R — радиус окружности. Знак оценочной функции (см.(5.11)) в предыдущем такте управления определяет операцию в последующем такте. Для интерполирования дуги окружности задается номер квадранта и координаты начальной x_0, y_0 и конечной x_k, y_k точек дуги. Для воспроизведения дуги окружности в положительном направлении (против часовой стрелки) в первом квадранте осуществляется следующий алгоритм управления (рис. 5.9). Если $F_i \geq 0$ (точка находится вне окружности или на ней), то очередной шаг делается вдоль отрицательного направления оси X , т.е. $x_{i+1} = x_i - 1$; если $F_i < 0$ (точка находится внутри окружности), то очередной шаг делается в положительном направлении оси Y , т.е. $y_{i+1} = y_i + 1$.

После очередного шага по оси X получим новое значение оценочной функции:

$$F_{i+1} = (x_i - 1)^2 + y_i^2 - R^2 = F_i - 2x_i + 1, \quad (5.12)$$

которое отличается от предыдущего на величину $(-2x_i + 1)$.

После шага по оси Y новое значение оценочной функции

$$F_{i+1} = x_i^2 + (y_i + 1)^2 - R^2 = F_i + 2y_i + 1 \quad (5.13)$$

отличается от предыдущего на величину $2y_i + 1$.

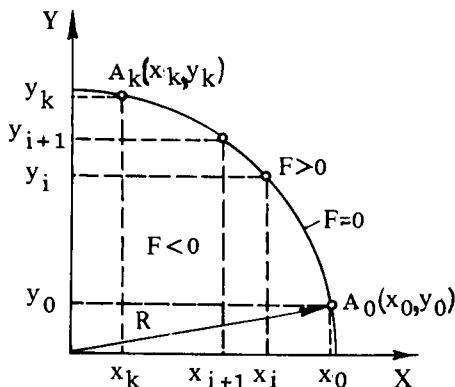


Рис. 5.9. Круговая интерполяция по методу оценочной функции.

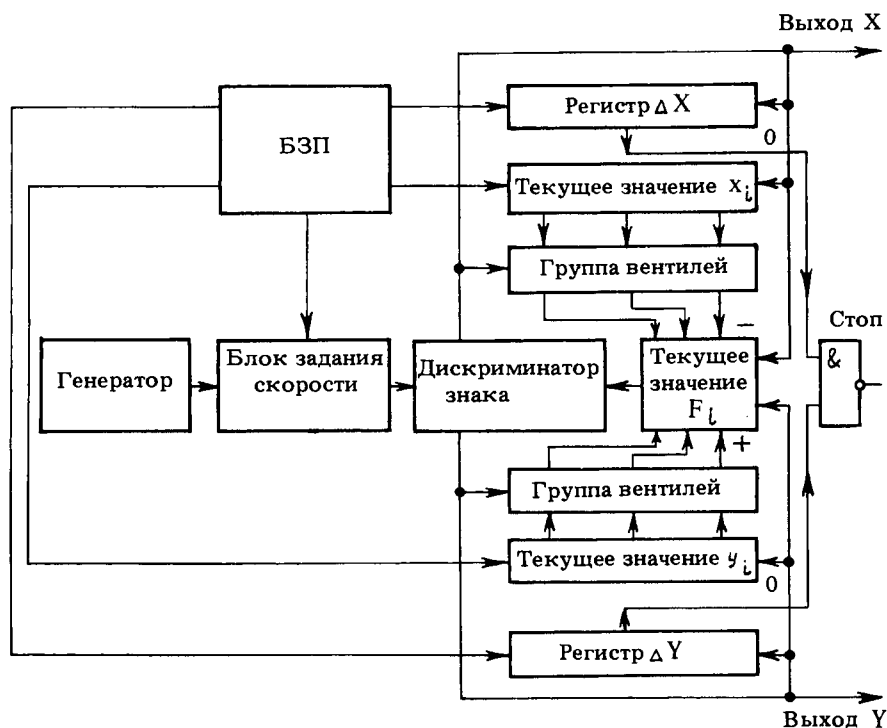


Рис. 5.10. Функциональная схема кругового интерполятора по методу оценочной функции.

Выражения (5.12) и (5.13) позволяют построить структуру кругового интерполятора (рис. 5.10). Из блока задания программы (БЗП) информация о приращениях координат ΔX и ΔY поступает в соответствующие регистры. В блоки текущих значений x_i и y_i записываются координаты начальной точки дуги окружности x_0 и y_0 . В начальный момент $F_0 = 0$, поскольку точка x_0 , y_0 находится на дуге окружности. Тогда, согласно (5.12), управляющий импульс поступит в систему управления электроприводом по оси X в отрицательном направлении, откроется группа клапанов и удвоенное текущее значение x_i с отрицательным знаком прибавится к текущему значению оценочной функции (сюда же прибавится единица); содержимое регистров ΔX и X_i изменится на единицу. Таким образом, сформируется новое значение оценочной функции. При $F_i > 0$ работа интерполятора происходит аналогично. При $F_i < 0$ "работает" нижняя часть схемы интерполятора (см. рис. 5.10), согласно выражению (5.13). Нетрудно заметить, что работа интерполятора при обработке траектории в других квадрантах и при другом направлении обхода отличается от рассмотренной реакцией при оценке знака F_i , а также знаками при составляющих $2x_i$ и $2y_i$ в (5.12) и (5.13).

В табл. 5.3 для примера приведено вычисление шагов, необходимых для воспроизведения дуги окружности с параметрами $R = 20$; $x_n = 20$; $y_0 = 0$;

Номер п/п	Оценочная функция	Шаг по осям		Текущие координаты	
		$-X$	Y	X_i	Y_i
1	2	3	4	5	6
0	$F_0 = 0$	—	—	20	0
1	$F_1 = 0 - 2 \cdot 20 + 1 = -39$	1	0	19	0
2	$F_2 = -39 + 2 \cdot 0 + 1 = -38$	0	1	19	1
3	$F_3 = -38 + 2 \cdot 1 + 1 = -35$	0	1	19	2
4	$F_4 = -35 + 2 \cdot 2 + 1 = -30$	0	1	19	3
5	$F_5 = -30 + 2 \cdot 3 + 1 = -23$	0	1	19	4
6	$F_6 = -23 + 2 \cdot 4 + 1 = -14$	0	1	19	5
7	$F_7 = -14 + 2 \cdot 5 + 1 = -3$	0	1	19	6
8	$F_8 = -3 + 2 \cdot 6 + 1 = +10$	0	1	19	7
9	$F_9 = 10 - 2 \cdot 19 + 1 = -27$	1	0	18	7
10	$F_{10} = -27 + 2 \cdot 7 + 1 = -12$	0	1	18	8
11	$F_{11} = -12 + 2 \cdot 8 + 1 = +5$	0	1	18	9
12	$F_{12} = 5 - 2 \cdot 18 + 1 = -30$	1	0	17	9
13	$F_{13} = -30 + 2 \cdot 9 + 1 = -11$	0	1	17	10
14	$F_{14} = -11 + 2 \cdot 10 + 1 = +10$	0	1	17	11
15	$F_{15} = 10 - 2 \cdot 17 + 1 = -23$	1	0	16	11
16	$F_{16} = -23 + 2 \cdot 11 + 1 = 0$	0	1	16	12
17	$F_{17} = 0 - 2 \cdot 16 + 1 = -31$	1	0	15	12
18	$F_{18} = -31 + 2 \cdot 12 + 1 = -6$	0	1	15	13
19	$F_{19} = -6 + 2 \cdot 13 + 1 = +21$	0	1	15	14
20	$F_{20} = 21 - 2 \cdot 15 + 1 = -8$	1	0	14	14
21	$F_{21} = -8 + 2 \cdot 14 + 1 = +21$	0	1	14	15
22	$F_{22} = 21 - 2 \cdot 14 + 1 = -6$	1	0	13	15
23	$F_{23} = -6 + 2 \cdot 15 + 1 = +25$	0	1	13	16
24	$F_{24} = 25 - 2 \cdot 13 + 1 = 0$	1	0	12	16
25	$F_{25} = 0 - 2 \cdot 12 + 1 = -23$	1	0	11	16
26	$F_{26} = -23 + 2 \cdot 16 + 1 = +10$	0	1	11	17
27	$F_{27} = 10 - 2 \cdot 11 + 1 = -11$	1	0	10	17
28	$F_{28} = -11 + 2 \cdot 17 + 1 = +24$	0	1	10	18
29	$F_{29} = +29 - 2 \cdot 10 + 1 = +9$	1	0	9	18
30	$F_{30} = 9 - 2 \cdot 9 + 1 = -12$	1	0	8	18

1	2	3	4	5	6
31	$F_{31} = -12 + 2 \cdot 18 + 1 = +25$		0 1		8 19
32	$F_{32} = 25 - 2 \cdot 8 + 1 = +10$		1 0		7 19
33	$F_{33} = 10 - 2 \cdot 7 + 1 = -3$		1 0		6 19
34	$F_{34} = -3 + 2 \cdot 19 + 1 = +36$		0 1		6 20
35	$F_{35} = 36 - 2 \cdot 6 + 1 = +25$		1 0		5 20
36	$F_{36} = 25 - 2 \cdot 6 + 1 = +16$		1 0		4 20
37	$F_{37} = 16 - 2 \cdot 4 + 1 = +9$		1 0		3 20
38	$F_{38} = 9 - 2 \cdot 3 + 1 = +4$		1 0		2 20
39	$F_{39} = 4 - 2 \cdot 2 + 1 = +1$		1 0		1 20
40	$F_{40} = 1 - 2 \cdot 1 + 1 = 0$		1 0		0 20

$x_k = 0$; $y_k = 20$. Воспроизведение дуги окружности, построенной с помощью рассматриваемого алгоритма, показано на рис. 5.11, а.

Для повышения контурной скорости можно усовершенствовать алгоритм круговой интерполяции. Рассматривая движение по траектории, изображенной на рис. 5.11, а, нетрудно увидеть, что на участке $A_0 - A_1$ при изменении угла $0 < \varphi < \pi/4$ скорость по координате Y имеет большее значение, чем по координате X . Это позволяет назвать координату Y ведущей на названном участке. При $\pi/4 < \varphi < \pi/2$ ведущей координатой является X . Усовершенствование алгоритма заключается в том, что как и при линейной интерполяции, по ведущей координате приращения выдаются на каждом шаге. Отличие от линейной интерполяции в данном случае заключается в следующем: если участок интерпо-

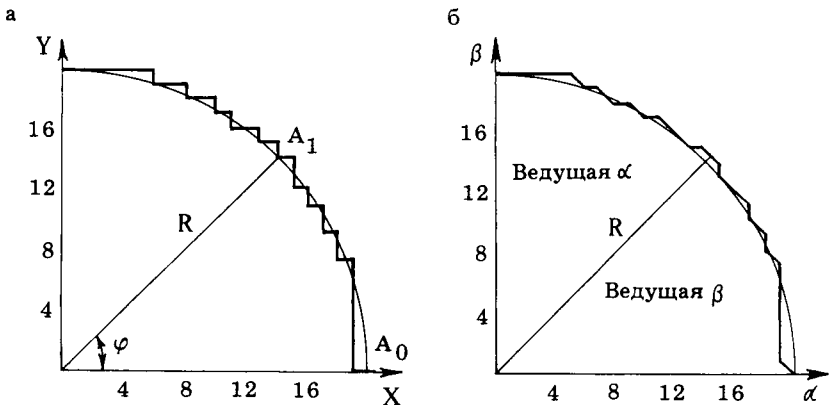


Рис. 5.11. Дуга окружности, построенная по методу оценочной функции:
а – обычный алгоритм, б – модифицированный.

Таблица 5.4

Но- мер п/п	Оценочная функция	Шаг		Текущие координаты		$\alpha_i - \beta_i$	Ведущая координата
		α	β	α_i	β_i		
0	$F_0 = 0$	—	—	20	0	+20	β
1	$F_1 = 0 - 2 \cdot 20 + 2 = -38$	1	1	19	1	+18	— " —
2	$F_2 = -38 + 2 + 1 = -35$	0	1	19	2	+17	— " —
3	$F_3 = -35 + 2 \cdot 2 + 1 = -30$	0	1	19	3	+16	— " —
4	$F_4 = -30 + 2 \cdot 3 + 1 = -23$	0	1	19	4	+15	— " —
5	$F_5 = -23 + 2 \cdot 4 + 1 = -14$	0	1	19	5	+14	— " —
6	$F_6 = -14 + 2 \cdot 5 + 1 = -3$	0	1	19	6	+13	— " —
7	$F_7 = -3 + 2 \cdot 6 + 1 = +10$	0	1	19	7	+12	— " —
8	$F_8 = +10 - 2 \cdot 12 + 2 = -12$	0	1	18	8	+10	— " —
9	$F_9 = -12 + 2 \cdot 8 + 1 = +5$	0	1	18	9	+9	— " —
10	$F_{10} = +5 - 2 \cdot 9 + 2 = -11$	1	1	17	10	+7	— " —
11	$F_{11} = -11 + 2 \cdot 10 + 1 = +10$	0	1	17	11	+6	— " —
12	$F_{12} = +10 - 2 \cdot 6 + 2 = 0$	1	1	16	12	+4	— " —
13	$F_{13} = 0 - 2 \cdot 4 + 2 = -6$	1	1	15	13	+2	— " —
14	$F_{14} = -6 + 2 \cdot 13 + 1 = +21$	0	1	15	14	+1	— " —
15	$F_{15} = +21 - 2 \cdot 1 + 2 = +21$	1	1	14	15	-1	α
16	$F_{16} = +21 - 2 \cdot 14 + 1 = -6$	1	0	13	15	-2	— " —
17	$F_{17} = -6 - 2 \cdot (-2) + 2 = 0$	1	1	12	16	-4	— " —
18	$F_{18} = 0 - 2 \cdot (-4) + 2 = +10$	1	1	11	17	-6	— " —
19	$F_{19} = +10 - 2 \cdot 11 + 1 = -11$	1	0	10	17	-7	— " —
20	$F_{20} = -11 - 2 \cdot (-7) + 2 = +5$	1	1	9	18	-9	— " —
21	$F_{21} = +5 - 2 \cdot 9 + 1 = -12$	1	0	8	18	-10	— " —
22	$F_{22} = -12 - 2 \cdot (-10) + 2 = +10$	1	1	7	19	-12	— " —
23	$F_{23} = +10 - 2 \cdot 7 + 1 = -3$	1	0	6	19	-13	— " —
24	$F_{24} = -3 - 2 \cdot (-13) + 2 = +25$	1	1	5	20	-15	— " —
25	$F_{25} = +25 - 2 \cdot 5 + 1 = +16$	1	0	4	20	-16	— " —
26	$F_{26} = +16 - 2 \cdot 4 + 1 = +9$	1	0	3	20	-17	— " —
27	$F_{27} = +9 - 2 \cdot 3 + 1 = +4$	1	0	2	20	-18	— " —
28	$F_{28} = +4 - 2 \cdot 2 + 1 = +1$	1	0	1	20	-19	— " —
29	$F_{29} = +1 - 2 \cdot 1 + 1 = 0$	1	0	0	20	-20	— " —

ляции в пределах одного квадранта охватывает угол $\varphi > \pi/4$, то ведущая координата меняется, и это изменение происходит при $\varphi = \pi/4$.

Введем обозначения $x = \alpha$; $y = \beta$ и для определения ведущей координаты вычислим разность $\alpha - \beta$. Тогда получим, что $\alpha - \beta$ — ведущая координата при $\alpha - \beta < 0$; β — ведущая координата при $\alpha - \beta > 0$.

Рассматривая воспроизведение дуги окружности (рис. 5.11, б) против часовой стрелки в первом квадранте при выдаче шагов одновременно по обеим координатам, получим $F_{i+1} = (\alpha_i - 1)^2 + (\beta_i + 1)^2 - R^2 = F_i - 2\alpha_i + 2\beta_i + 2 = F_i - 2(\alpha_i - \beta_i) + 2$. Таким образом, при $F_i \geq 0$ и движении в пределах $0 < \varphi < \pi/4$ выдача шагов производится по обеим координатам, а при $F_i < 0$ — только по ведущей координате, т.е.

$$F_{i+1} = \alpha_i^2 + (\beta_i + 1)^2 - R^2 = F_i + 2\beta_i + 1. \quad (5.14)$$

При $\pi/4 < \varphi < \pi/2$ и $F_i < 0$ выдача шагов производится по обеим координатам, при $F_i \geq 0$ — только по ведущей координате, т.е.

$$F_{i+1} = (\alpha_i - 1)^2 + \beta_i^2 - R^2 = F_i - 2\alpha_i + 1. \quad (5.15)$$

Вычисление шагов модифицированным алгоритмом оценочной функции по (5.14), (5.15) приведено в табл. 5.4 (параметры окружности те же, что и в табл. 5.3). Построенная по этому алгоритму дуга окружности изображена на рис. 5.11, б. Из табл. 5.3 и 5.4, а также рис. 5.11 видно, что при модифицированном алгоритме круговой интерполяции по МОФ затрачивается меньшее число шагов. Это приводит к увеличению контурной скорости обработки траектории.

При постоянном значении частоты генератора задания скорости контурная скорость непостоянна и имеет максимум в точке, соответствующей $\varphi = \pi/4$. Это недопустимо с технологической точки зрения, поэтому частоту генератора необходимо корректировать. На участке с ведущей координатой β она должна уменьшаться с каждым шагом по β на значение v_z/R , а на участке с ведущей координатой α — увеличиваться на ту же величину с выдачей каждого шага по α (v_z — заданная контурная скорость).

Погрешность интерполяции по МОФ не превышает заданного значения дискретности. Важным достоинством МОФ являются простота стыковки с шаговым электроприводом и небольшая требуемая разрядность устройства ЧПУ, определяемая максимальными значениями координат при заданной дискретности.

Недостатки МОФ заключаются в сравнительно небольшой контурной скорости, что определяется ценой шага и быстродействием устройства ЧПУ, а также в необходимости преобразования унитарного кода для связи устройства ЧПУ с циклическими датчиками положения типа вращающегося трансформатора и индуктосина.

Метод оценочной функции используется в устройствах ЧПУ типа Н-33, Н-55 и др.

5.4. ИНТЕРПОЛЯТОРЫ НА ЦИФРОВЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРАХ

Интерполяция с использованием цифровых дифференциальных анализаторов (ЦДА) заключается в моделировании дифференциального уравнения воспроизводимой траектории с помощью специализированных вычислительных устройств, называемых *дифференциальными анализаторами*. Отметим, что в отличие от данного метода МОФ основан на моделировании алгебраического уравнения воспроизводимой траектории.

Решение дифференциальных уравнений широко используется в аналоговой вычислительной машине (АВМ) непрерывного действия. Особенностью системы ЧПУ является дискретный характер задания информации.

Уравнения траекторий движения изображающей точки могут быть получены при решении разностных (в отличие от дифференциальных) уравнений с помощью цифровых (или разностных) дифференциальных анализаторов.

Принципы построения цифровых моделей для решения разностных уравнений и аналоговых моделей для решения обыкновенных дифференциальных уравнений одинаковы.

Задача интерполяции с использованием ЦДА сводится к следующему:

- 1) находится обыкновенное дифференциальное уравнение в непрерывной форме, решением которого является уравнение воспроизводимой траектории;
- 2) составляется аналоговая модель для решения дифференциального уравнения;
- 3) на основе аналоговой модели строится цифровой дифференциальный анализатор, осуществляющий решение уравнения в цифровом виде.

Получение дифференциальных уравнений, решением которых является заданная кривая, в общем виде является сложной задачей и описано В.С. Кулебакиным в виде метода $K(D)$ -преобразования. В машиностроении наиболее часто встречаются отрезки прямых и дуг окружностей, для которых нахождение дифференциальных уравнений не представляет трудностей.

Для интерполирования прямолинейного участка траектории запишем уравнения:

$$y = \frac{\Delta y}{\Delta x} x; \quad \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (5.16)$$

где Δx , Δy — заданные в кадре приращения.

Дифференциальное уравнение отрезка прямой (5.16) может быть приведено к двум параметрическим:

$$\frac{dy}{dt} = \omega \Delta y; \quad \frac{dx}{dt} = \omega \Delta x, \quad (5.17)$$

Решение уравнений (5.17) осуществляется с помощью аналоговой модели, представляющей собой два независимых интегратора. Результатом решения и будет уравнение заданной прямой.

Для реализации кругового интерполятора запишем уравнение окружности

$$(x + x_0)^2 + (y + y_0)^2 = R^2, \quad (5.18)$$

где x_0 , y_0 — координаты начальной точки дуги окружности относительно ее центра, совмещенного с началом координат.

Дифференцируя (5.18) по x , получаем

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{x + x_0}{y + y_0}. \quad (5.19)$$

Переходя к дифференциальным параметрическим уравнениям, из (5.19) находим

$$\frac{dy}{dt} = \omega (x + x_0); \quad \frac{dx}{dt} = -\omega (y + y_0), \quad (5.20)$$

где ω — параметр.

Решение данной системы уравнений (5.20) может быть осуществлено с помощью аналоговой модели. Базовым элементом для интерполяции является интегратор. Связи между интеграторами могут быть заданы признаками "линейная интерполяция" или "круговая интерполяция".

В интерполяторах, использующих ЦДА, полностью повторены структуры аналоговой модели, но с особенностями, присущими цифровым вычислительным устройствам.

Приближенные вычисления интеграла могут быть произведены по формулам прямоугольников и трапеций

$$S_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n x_i \Delta t; \quad S_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n \left(x_{i-1} + \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta t. \quad (5.21)$$

В устройствах ЧПУ процессы интерполяции и выдачи управляющих команд непосредственно между собой не связаны. Поэтому масштабные множители в интерполяторах роли не играют. Необходимо лишь, чтобы между интерполяторами выдерживались масштабные соотношения. Тогда вычисления интегралов (5.21) можно производить по формулам:

$$S_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n x_i; \quad S_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n \left(x_{i-1} + \frac{\Delta x}{2} \right). \quad (5.22)$$

Выходной сигнал интерполятора выдается в унитарном коде, поэтому приращения по координатам нулевые либо единичные. Тогда $\Delta x/2 = 1/2$, и формула трапеций (5.22) приобретает вид

$$S_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n (x_{i-1} + 1/2_{(i)}), \quad (5.23)$$

где индекс i при слагаемом $1/2_{(i)}$ означает, что при каждой операции суммирования прибавляется $1/2$.

Таким образом, цифровое интегрирование при круговой интерполяции сводится к операции суммирования по (5.23). При линейной интерполяции цифровое интегрирование еще проще и заключается в суммировании координат приращений $S = \sum_{i=1}^n \Delta x$.

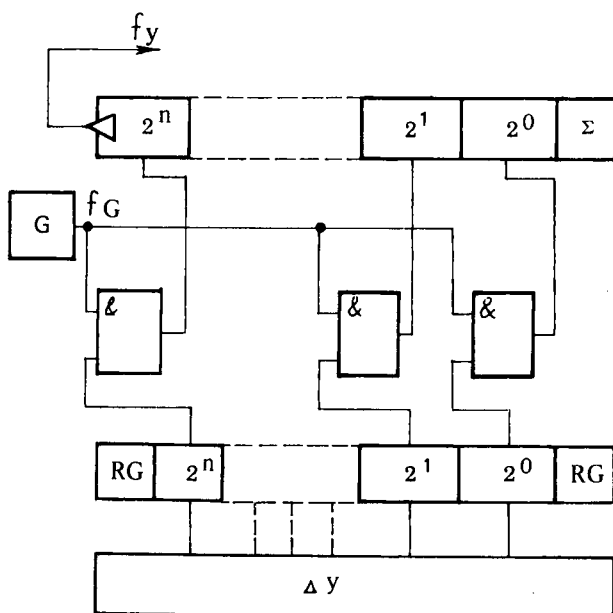


Рис. 5.12. Схема интегратора с параллельным переносом.

Аналоговый интегратор выполняется по схеме операционного усилителя, охваченного обратной связью в виде конденсатора. *Цифровой интегратор* может быть выполнен по схеме параллельного или последовательного переноса.

При работе интегратора с параллельным переносом (рис. 5.12) в регистр RG вводится значение подынтегральной функции. Это число периодически передается в сумматор Σ с помощью ИС, управляемых импульсами тактового генератора G . В этом случае каждый импульс генератора является приращением независимой переменной Δt . С приходом каждого импульса f_G к числу, содержащемуся в сумматоре, добавляется содержимое регистра, т.е. значение подынтегральной функции.

Выходной величиной интегратора являются импульсы переполнения сумматора. Частота этих импульсов f_y пропорциональна числу Δy , находящемуся в регистре:

$$f_y = \Delta y \frac{f_G}{N_\Sigma} = \frac{\Delta y}{\Delta t}, \quad (5.24)$$

где f_G — частота генератора; N_Σ — емкость сумматора в импульсах, включая импульс переполнения; $N_\Sigma / f_G = \Delta t = \text{const}$ — постоянное по величине приращение независимой переменной, т.е. времени.

Если содержимое RG в периоды между импульсами f_G будет меняться, т.е. $\Delta y = y(t)$, то при этом получим интегрирование функции $f_y(t)$.

Несовпадение импульсов f_G с импульсами $y(t)$ позволяет считать аргу-

мент Δt и функцию $f_y(t)$ непрерывными и записать (5.24) в форме $dy = f_y(t)dt$, откуда

$$y(t_{\text{ц}}) = \int_0^{t_{\text{ц}}} f_y(t)dt \cong \Delta t \sum_{i=1}^n f_{yi}, \dots, \quad (5.25)$$

где $t_{\text{ц}}$, n – время и число шагов интегрирования; f_{yi} – значение $f_y(t)$ на i -м шаге.

Как следует из (5.25), устройство (рис. 5.6) выполняет преобразование числа Δy в частоту f_y , т.е. является управляемым делителем частоты (УДЧ). УДЧ становится интегратором, если на его выход ставится какой-либо накопитель, например счетчик импульсов, следящий или ШД (в этом случае угол поворота вала двигателя пропорционален числу импульсов).

Рассмотрим работу схемы интегратора с последовательным переносом (рис. 5.13, а), построенной для четырехразрядного числа. Импульсы генератора f_G поступают на двоичный счетчик импульсов, собранный на триггерах Т1, ..., Т4, работающий как делитель частоты. В делителе каждая последующая ячейка меняет свое состояние при переходе предыдущей из состояния 1 в состояние 0. Выходные импульсы $Q'1, \dots, Q'4$ поступают на формирователи F , которые могут быть выполнены, например, на одновибраторах. Формирователь срабатывает по переднему фронту и на выходе выдает короткий импульс. Благодаря этому на выходе формирователей импульсы $Q'1, \dots, Q'4$ по времени не совпадают (рис. 5.14). Сигналы с выходов формирователей поступают на ИС, на вторые входы которых подаются сигналы регистра RG, где записывается подынтегральная функция. Очевидно, что число разрядов регистра RG и двоичного счетчика должно быть одинаково. На входы схемы объединения поступают импульсы с ячеек ИС, на выходе ее образуются импульсы частотой f_x , являющиеся выходом интегратора. Такие схемы получили название двоичных умножителей частоты. Таким образом, если во всех ячейках RG записаны 1, то на выход проходят все импульсы двоичного счетчика $Q1, \dots, Q4$.

На рис. 5.14 импульсы на выходе схемы получены для двух вариантов содержимого регистра при числе в RG, равном 1111, и числе в RG, равном 1001. Двоичный счетчик может быть выполнен на микросхемах К155ИЕ5, КМ155ИЕ5, регистр RG – на микросхемах К155ИР1, КМ155ИР2.

Так же как и в предыдущем случае, регистр RG может быть реализован в виде реверсивного счетчика, на вход которого подаются приращения Δy подынтегральной функции.

Оба устройства становятся интеграторами в полном смысле только в том случае, если на их выходы включены устройства, суммирующие импульсы: счетчик импульсов, электропривод, скорость перемещения которого определяется частотой импульсов.

Описанные интеграторы являются основными элементами интерполяторов любого вида.

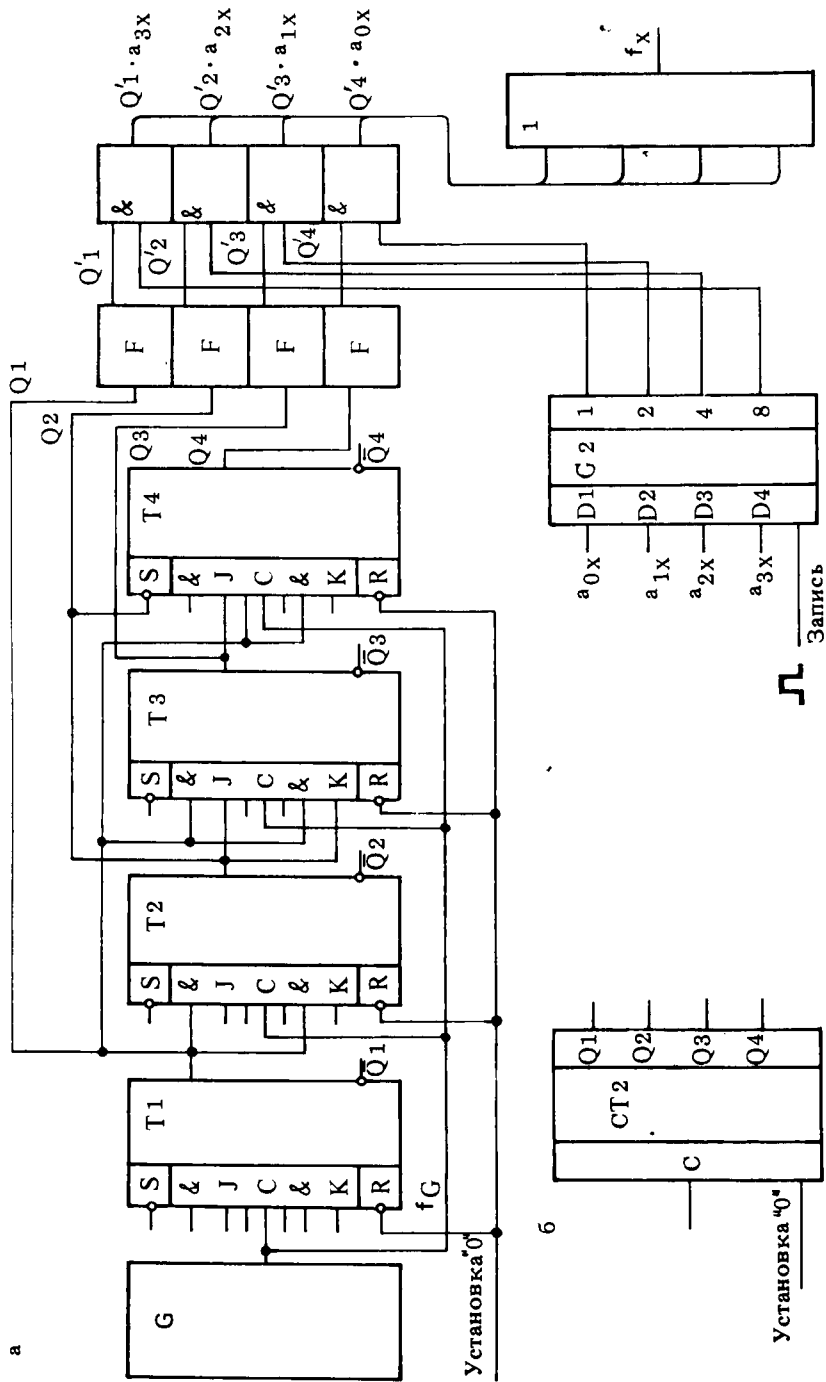


Рис. 5.13. Схема интегратора с последовательным переносом.

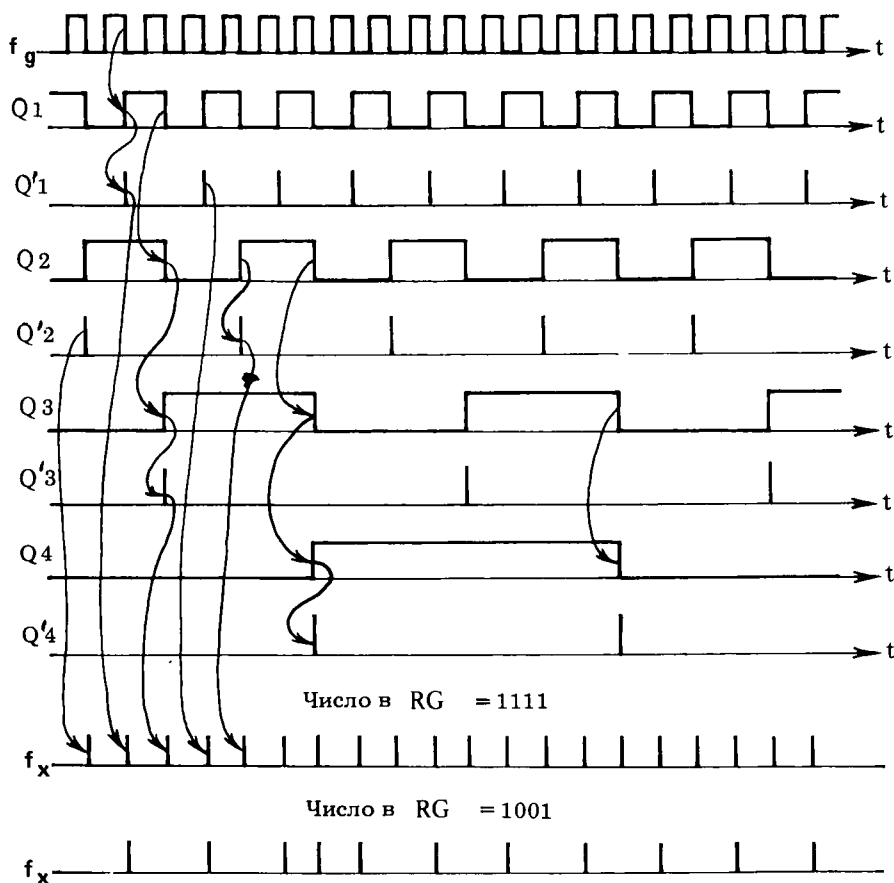


Рис. 5.14. Диаграмма работы двоичного умножителя.

5.5. МЕТОД ЦИФРОВОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Метод цифрового интегрирования (МЦИ) заключается в том, что приращения по координатам вычисляются за определенный квант времени и могут отличаться от единичных.

При использовании МЦИ значение i -й координаты и скорости ее изменения в момент времени t вычисляются по формулам:

$$v_i = v_{i0} + \int_0^t a_i dt; \quad s_i = s_{i0} + \int_0^t v_i dt, \quad (5.26)$$

где s_{i0}, v_{i0} — начальные значения i -й координаты и ее скорости при $t = 0$; s_i, v_i, a_i — текущие значения i -й координаты, ее скорости и ускорения в момент времени t .

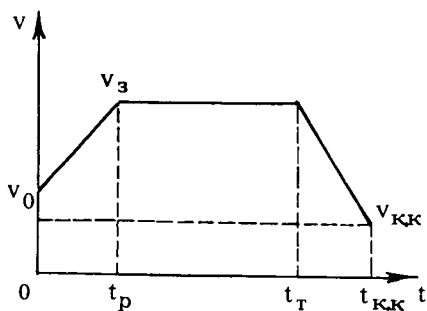


Рис. 5.15. Изменение контурной скорости при линейной интерполяции.

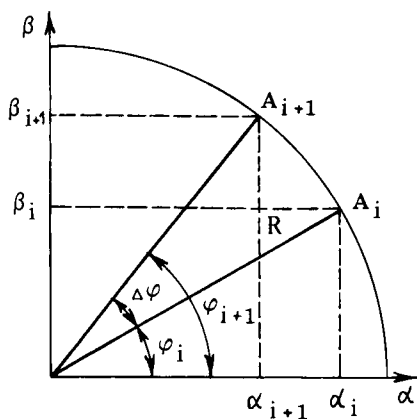


Рис. 5.16. Текущие значения координат при круговой интерполяции.

Определенная траектория движения формируется заданием закона изменения ускорения во времени $a_i(t)$. Время реализации алгоритма, вычисляемое по (5.26), зависит от метода вычисления определенного интеграла. Так, наименее трудоемким является метод прямоугольников (Эйлера).

При постоянном ускорении формулы (5.25) приобретают вид:

$$\begin{aligned} v_{i,j+1} &= v_{i,j} + a_i \Delta t; \\ s_{i,j+1} &= s_{i,j} + (v_{i,j} + v_{i,j+1}) \Delta t / 2, \end{aligned} \quad (5.27)$$

где Δt — квант интегрирования; j — шаг интегрирования. Поскольку в соответствии с методом МЦИ $\Delta t = \text{const}$, то в (5.27) операция умножения исключается введением соответствующих масштабов скорости и ускорения по координатам.

При реализации линейной интерполяции в пределах кадра изменение скорости происходит так, как показано на рис. 5.15, где можно выделить следующие участки: $0 - t_p$ — разгон (движение с постоянным ускорением); $t_p - t_T$ — движение с постоянной скоростью; $t_T - t_{к.к}$ — торможение. Значения скорости следующие: v_0 — начальное, $v_з$ — заданное; $v_{к.к}$ — скорость в конце кадра. При обработке малых перемещений участок с постоянным значением скорости может отсутствовать, т.е. $t_p = t_T$. Интервалы времени $t_p, t_T, t_{к.к}$ выбираются одинаковыми для всех координат. Ввиду приближенного вычисления интегралов по (5.26) накапливается погрешность при определении скорости и координаты. Для уменьшения погрешности в конце участка разгона скоростям по каждой координате присваиваются заранее рассчитанные значения. Накопленные погрешности при определении координат от кадра к кадру исключаются вследствие того, что в конце отработки кадра координатам присваиваются точные значения.

Реализация круговой интерполяции методом МЦИ требует интегрирования дифференциальных уравнений окружности. Для обеспечения необходимой

точности следует применять алгоритмы, требующие значительных затрат машинного времени (Рунге–Кутта, Адамса и др.). Рассмотрим более простой алгоритм, не требующий операции интегрирования и основанный на нахождении проекций на координатные оси радиуса R окружности.

Подобно случаю линейной интерполяции (5.26), значения угловой скорости ω_{i+1} и угла поворота φ_{i+1} находим, используя их предыдущие значения ω_i и φ_i , т.е.

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \epsilon \Delta t; \varphi_{i+1} = \varphi_i + (\omega_i + \omega_{i+1}) \Delta t / 2, \quad (5.28)$$

где ϵ — угловое ускорение. Найденные значения скорости и угла поворота используются для определения моментов окончания разгона, начала торможения и окончания отработки кадра.

Зная угол поворота, из (5.28) находим значения координат α_{i+1} и β_{i+1} (рис. 5.16):

$$\begin{aligned} \alpha_{i+1} &= R \cos \varphi_{i+1}; \beta_{i+1} = R \sin \varphi_{i+1}; \\ \varphi_{i+1} &= \varphi_i + \Delta \varphi; \Delta \varphi = (\omega_i + \omega_{i+1}) \Delta t / 2, \end{aligned}$$

откуда

$$\alpha_{i+1} = R \cos \varphi_i \cos \Delta \varphi_i - R \sin \varphi_i \sin \Delta \varphi_i; \quad (5.29)$$

$$\beta_{i+1} = R \sin \varphi_i \cos \Delta \varphi_i + R \cos \varphi_i \sin \Delta \varphi_i. \quad (5.29)$$

Непосредственная реализация вычислений по (5.29) в реальном времени затруднена, так как содержит четыре операции умножения. Поэтому целесообразно ввести некоторые упрощения. Ввиду малости $\Delta \varphi_i$ можно записать: $\cos \Delta \varphi_i \approx 1 - 0,5 \Delta \varphi_i^2$; $\sin \Delta \varphi_i \approx \Delta \varphi_i$. Учитывая, что $R \cos \varphi_i = \alpha_i$, $R \sin \varphi_i = \beta_i$, получаем:

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i (1 - 0,5 \Delta \varphi_i^2) - \beta_i \Delta \varphi_i; \quad (5.30)$$

$$\beta_{i+1} = \beta_i (1 - 0,5 \Delta \varphi_i^2) + \alpha_i \Delta \varphi_i.$$

Для управления приводами обычно формируют сигналы скоростей по координатам. Для получения таких сигналов применяют приращения по координатам за интервал времени Δt . Используя (5.30), получаем:

$$v(\alpha)_{i+1} = -(\beta_i \Delta \varphi_i + 0,5 \alpha_i \Delta \varphi_i^2) / \Delta t;$$

$$v(\beta)_{i+1} = (\alpha_i \Delta \varphi_i - 0,5 \beta_i \Delta \varphi_i^2) / \Delta t.$$

Подготовка исходных данных для круговой интерполяции методом МЦИ заключается в следующем: 1) устанавливаются абстрактные координаты α, β ; 2) задаются координаты центра окружности, координаты начальной и конечной точек; 3) задается контурная скорость; 4) определяются угловое ускорение и скорость.

Метод цифрового интегрирования используется также для формирования заданий при отработке сложных кривых, когда применяют параметрическое задание изменения координат в виде временных полиномов третьей степени.

6. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

6.1. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ И В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Управление исполнительными механизмами осуществляется с помощью систем привода, преобразующих сигналы управления в соответствующее состояние механизма. Робототехнические комплексы и оборудование с ЧПУ представляют собой сложные устройства, содержащие большое количество механизмов с различными типами двигателей, работа которых организуется в соответствии с общей программой с целью получения требуемого результата наиболее эффективным путем. Отдельные механизмы снабжаются электрическим, гидравлическим или пневматическим приводом. Наиболее распространенным типом привода является электропривод.

Существующие системы ЭП классифицируются по различным признакам. Самым существенным из них является тип используемого электродвигателя, в соответствии с которым различают следующие классы электроприводов: 1) ЭП с двигателем постоянного тока; 2) ЭП с двигателем переменного тока; 3) ЭП с шаговым двигателем. Каждый из названных классов может быть подразделен на более мелкие группы в зависимости от конкретных типов электродвигателей и других признаков. С учетом основных функций механизма и режимов его работы различают ЭП зажимных устройств и устройств натяжения, ЭП систем стабилизации скорости, позиционный ЭП, следящий ЭП и др.

ЭП с двигателями постоянного и переменного тока используются в системах непрерывного и релейного управления для получения заданного закона движения. *ЭП с шаговыми двигателями* реализуют заданное движение как результат суммирования отдельных шаговых перемещений.

Шаговые двигатели имеют специфическую конструкцию, позволяющую фиксировать каждый шаг перемещения. По принципу действия ШД можно рассматривать как синхронный двигатель, позволяющий осуществлять синхронность движения при пуске и торможении, а также допускающий длительную фиксированную остановку с протеканием постоянного тока в обмотках ротора. В то же время ШД является аналогом обращенной машины постоянного тока с поворотом щеток коллектора, имитируемым коммутатором ШД.

ШД различаются по числу фаз, по типу магнитной системы и способу возбуждения. Наиболее распространенными являются многофазные ШД с числом фаз m , равным 3, 4 и 5.

По способу возбуждения ШД делят на следующие виды:

- 1) *ШД с активным ротором* (с электромагнитным возбуждением или магнитоэлектрические, т.е. с возбуждением постоянными магнитами);
- 2) *индукторные ШД*, имеющие зубчатый пассивный ротор с числом зубцов Z_p и гребенчатые зубчатые зоны статора. Каждая гребенчатая зубчатая зона

представляет собой выступающий полюс статора. В симметричной магнитной системе обмотки противоположных полюсов объединяются в фазы, так что число пар полюсов p статора равно числу фаз m . Число зубцов ротора Z_p выбирается так: если ось какого-либо полюса статора совпадает с осью зубца ротора, то ось соседнего полюса статора оказывается сдвинутой относительно оси ближайшего зубца ротора на угол $2\pi/(mZ_p)$. При симметричной коммутации каждому переключению фаз соответствует угол поворота вектора намагничивающих сил $\alpha = 2\pi/m$ (электрических радиан) или $\alpha_r = 2\pi/2p$ (геометрических радиан). В результате переключения ротор займет новое положение, т.е. повернется на угол $\alpha_m = 2\pi/mZ_p$. Таким образом, механический шаг α_m оказывается меньше геометрического шага поля α_r . Отношение $\alpha_r/\alpha_m = mZ_p/2p$ называется *электромагнитной редукцией* (ЭР), а двигатель с ЭР, большей или равной 1, – *редукторным*.

Классификационным признаком индукторного ШД является постоянство потокоцепления контура возбуждения, который реализуется за счет постоянной составляющей тока обмоток фаз (самовозбуждение) или специальной обмотки возбуждения (независимое возбуждение);

3) *индукторно-реактивные ШД*, не имеющие отдельного контура возбуждения. При разнополярном управлении такие ШД развивают только реактивный момент, пропорциональный квадрату переменной составляющей тока фазы. При однополярной коммутации возникают одновременно реактивный и активный, или индукторный, момент, пропорциональный постоянной составляющей тока в фазе;

4) *реактивные ШД*, электромагнитный момент которых является реактивным независимо от наличия или отсутствия постоянных составляющих тока в фазах.

6.2. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

6.2.1. Коммутационные циклы, реализующие движение с основным шагом

Принцип действия ШД основан на дискретном изменении состояния электромагнитного поля в рабочем зазоре. В многофазных синхронных ШД изменение состояния поля достигается поочередным включением отдельных фаз (или групп фазных обмоток). При этом каждому состоянию электромагнитного поля соответствуют определенные величина и направление вектора намагничивающих сил машины F . В свою очередь установившемуся положению вектора F соответствует определенное угловое положение ротора ШД. Управление положением вектора намагничивающих сил может быть однополярным или разнополярным, симметричным или несимметричным, потенциальным или импульсным.

Однополярное потенциальное симметричное управление m -фазным ШД является наиболее простым. Оно состоит в последовательном переключении обмоток фаз ШД, осуществляемом таким образом, чтобы угловое положение вектора намагничивающих сил при каждом переключении изменялось на угол $\alpha = 2\pi/m$, а модуль вектора оставался постоянным. При этом число одновре-

менно возбуждаемых смежных фаз не должно превышать $m/2$ при четном и $(m+1)/2$ — при нечетном общем числе фаз m .

Например, для трехфазного ШД ($m = 3$) можно получить симметричное управление с поочередным включением одной из фаз или с одновременным включением двух смежных фаз.

Цикл коммутации, реализующей первый из этих способов, имеет вид $U_1 = (1) - (2) - (3) - (1) - \dots$. Здесь в скобках указаны номера фаз, возбужденных в течение очередного шага.

При попарном включении фазных обмоток получим симметричный цикл коммутации $U_2 = (12) - (23) - (31) - (12) - \dots$. Циклы U_1 и U_2 отличаются начальной фазой и величиной модуля вектора намагничивающих сил.

С увеличением числа фаз возрастает число шагов в цикле и количество возможных циклов симметричного потенциального управления. Так, для четырехфазного ШД ($m = 4$):

$$U_1 = (1) - (2) - (3) - (4) - (1) - \dots;$$

$$U_2 = (12) - (23) - (34) - (41) - (12) - \dots;$$

$$U_3 = (123) - (234) - (341) - (412) - (123) - \dots$$

Однако цикл U_3 здесь не имеет практического значения, так как в нем каждый раз две фазы включены навстречу друг другу.

Приведем циклы для пятифазного ШД ($m = 5$):

$$U_1 = (1) - (2) - (3) - (4) - (5) - (1) - \dots;$$

$$U_2 = (12) - (23) - (34) - (45) - (51) - (12) - \dots;$$

$$U_3 = (123) - (234) - (345) - (451) - (512) - (123) - \dots$$

Механический шаг поворота ротора ШД α_m определяется "электрическим" шагом α поворота вектора намагничивающих сил и числом пар полюсов p . При симметричном управлении $\alpha_m = \alpha/p = 2\pi/(pm)$. Число шагов на один оборот вала двигателя $n = pm$.

Если рабочий орган и электродвигатель связаны редуктором с передаточным числом $i_{ред}$, то угловой (или линейный) шаг рабочего органа

$$\alpha_{р.о} = \frac{\alpha_m}{i_{ред}} = \frac{2\pi}{i_{ред} pm}.$$

Однополярное потенциальное несимметричное управление отличается тем, что при таком управлении используются циклы коммутации, представляющие собой совмещение двух симметричных циклов, в результате которого шаг изменения электромагнитного состояния $\alpha = \pi/m$. При этом механический шаг поворота ротора и число шагов на оборот соответственно равны

$$\alpha_m = \frac{\pi}{pm}; n = 2pm.$$

Коммутационные циклы однополярного потенциального несимметричного управления имеют вид:

для $m = 3$

$$(1) - (12) - (2) - (23) - (3) - (31) - (1) - \dots;$$

для $m = 4$

$$(1) - (12) - (2) - (23) - (3) - (34) - (4) - (41) - (1) - \dots;$$

для $m = 5$

$$(1) - (12) - (2) - (23) - (3) - (34) - (4) - (45) - (5) - (51) -$$

$$(1) - \dots;$$

$$(12) - (123) - (23) - (234) - (34) - (345) - (45) - (451) -$$

$$(51) - (512) - (12) - \dots$$

При несимметричном управлении величина вектора намагничивающих сил при переключении изменяется в соответствии с числом возбужденных фаз.

Разнополярная коммутация позволяет для каждой фазы получить не одно, а два состояния. Поэтому электродвигатель с числом фаз m при разнополярной коммутации эквивалентен однополярно управляемому двигателю с числом фаз $2m$. По величине шага разнополярные двухфазный и трехфазный двигатели равносильны соответственно четырехфазному и шестифазному однополярным. При разнополярной коммутации лучше используются активные материалы (медь) двигателя, но усложняется конструкция коммутатора.

Импульсное управление ШД отличается от потенциального тем, что обмотки фаз включаются для получения заданного состояния импульсно (кратковременно). В промежутках между импульсами прикладываемого напряжения электродвигатель переходит в нулевое состояние, в котором напряжение, подводимое к обмоткам, равно нулю. Нулевое состояние не является активным. Для правильной работы шагового привода необходимо, чтобы в интервале между импульсами (в нулевом электромагнитном состоянии) ротор ШД сохранял положение, достигнутое на последнем шаге. Цикл коммутации для несимметричного импульсного управления при $m = 4$ имеет вид

$$Ц = (1-0) - (12-0) (2-0) (23-0) - (3-0) - (34-0) - (4-0) -$$

$$(41-0) - (1-0) - \dots$$

Шаг электромагнитного состояния при симметричном однополярном управлении называют *основным*, а электрический шаг при разнополярном и несимметричном управлении — *дробным*.

Так, для двухфазного ШД основной системой коммутации является двухтактная однополярная ($n_0 = 2, \alpha_0 = \pi$). При применении симметричной разнополярной коммутации $n = 4$ и $\alpha = \pi/2$. Наконец, при несимметричной разнополярной коммутации $n = 8$ и $\alpha = \pi/4$. Для трехфазного ШД возможны коммутации: симметричная однополярная ($n_0 = 3, \alpha_0 = 2\pi/3$), симметричная разнополярная и несимметричная однополярная ($n = 6, \alpha = \pi/3$) и несимметричная разнополярная ($n = 12, \alpha = \pi/6$). Четырехфазный ШД допускает коммутацию с $n_0 = 4$ ($\alpha_0 = \pi/2$), $n = 8$ ($\alpha = \pi/4$) и $n = 16$ ($\alpha = \pi/8$).

6.2.2. Электрическое дробление шага

Для повышения точности обработки заданного перемещения применяется электрическое дробление шага. Его реализация требует одновременного наличия тока не менее чем в двух фазах ШД. В результате электрического дробления статическая характеристика синхронизирующего момента ШД при подаче очередного импульса смещается на величину дробного шага $\alpha_{\text{др}} = (2\pi)/n$, где n равно соответственно νm и $2\nu m$ при однополярной и разнополярной коммутации; ν — число дробных шагов, соответствующее одному исходному шагу α .

Электрическое дробление шага является результатом соответствующего подбора соотношения токов во включенных обмотках ШД. Например, при очередной симметричной коммутации токи в переключаемых фазах i_1 и i_2 выбираются так, чтобы результирующий вектор тока I во всех промежуточных положениях, соответствующих отсчету n дробных шагов, оставался постоянным. Исходя из этого условия,

$$i_1 = I \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha}; i_2 = I \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}, \quad (6.1)$$

где α — величина основного шага; $\beta = (k/\nu)\alpha = k\alpha_{\text{др}}$; $\alpha_{\text{др}}$ — дробный шаг; $k = 0, 1, 2, 3, \dots, \nu$ — номер дробного шага. Например, при $m = 6$, $\alpha = 60^\circ$ (электр.), $\nu = 5$, $\alpha_{\text{др}} = 12^\circ$ (электр.) получим относительные значения силы токов $i_{1*} = i_1/I$ и $i_{2*} = i_2/I$; $k = 0$, $i_{1*} = 1$, $i_{2*} = 0$; $k = 1$, $i_{1*} = \sin 48/\sin 60 = 0,857$, $i_{2*} = \sin 12/\sin 60 = 0,24$; $k = 2$, $i_{1*} = \sin 36/\sin 60 = 0,67$, $i_{2*} = \sin 24/\sin 60 = 0,47$; $k = 3$, $i_{1*} = 0,47$, $i_{2*} = 0,67$; $k = 4$, $i_{1*} = 0,24$, $i_{2*} = 0,857$; $k = 5$, $i_{1*} = 0$, $i_{2*} = 1$.

Электрическое дробление шага может быть осуществлено с помощью двухчастотного управления или управления с промежуточным преобразованием код-аналог.

Упрощенная схема двухчастотного управления четырехфазным ШД дана на рис. 6.1. Генератор импульсов G с парафазными выходами вырабатывает импульсы частотой f , поступающие на входы делителя частоты Д1, Д2. Импульсы с частотой $f_1 = \epsilon_1 f$ поступают на вход В (вперед) распределителя импульсов (РИ), а импульсы частотой $f_2 = \epsilon_2 f$ — на вход Н (назад) РИ. Скорость ротора $\omega = \alpha(f_1 - f_2) = \alpha_{\text{др}} f$. Коэффициент деления шага $K_{\text{д}} = \frac{\alpha}{\alpha_{\text{др}}} = \frac{1}{\epsilon_1 - \epsilon_2}$. Ключи (К) усилителя мощности (УМ) подключают очередную обмотку ОУ1—ОУ4 шагового двигателя к источнику напряжения U (или источнику тока). Диоды V1—V4 и стабилитрон VS образуют шунтирующие цепи, необходимые для коммутации тока в обмотках ШД. Коэффициенты деления ϵ_1 и ϵ_2 устанавливаются сигналами, поступающими на входы Вх1, Вх2 делителей Д1 и Д2.

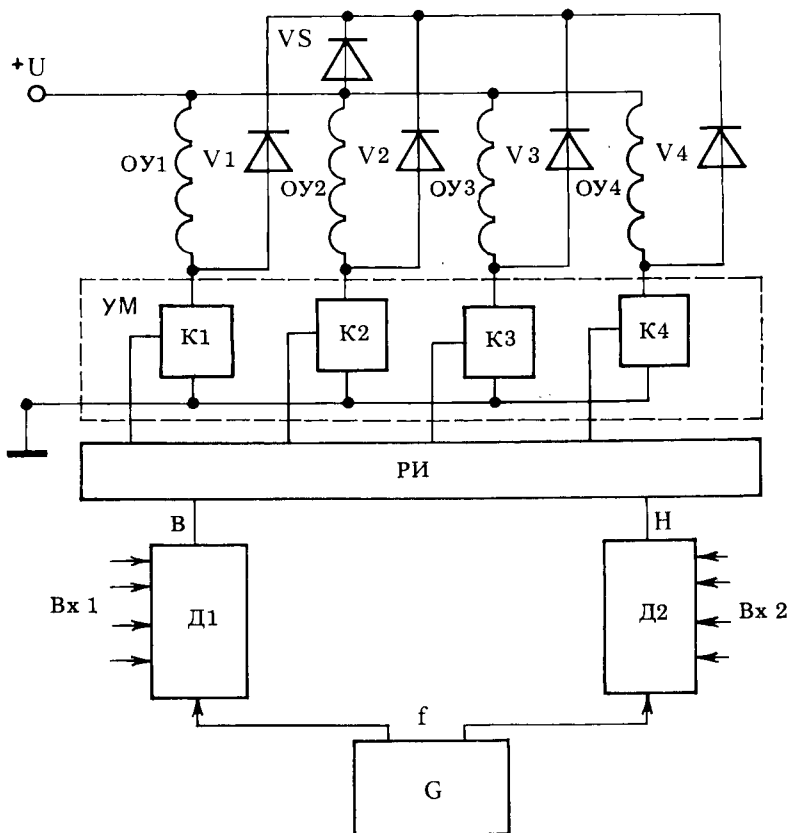


Рис. 6.1. Двухчастотное управление ШД.

На рис. 6.2 показана схема шагового привода с электрическим дроблением шага, использующая преобразователи код-аналог ПКА1 и ПКА2. В схеме применен четырехфазный ШД с обмотками фаз ОУ1–ОУ4. Переключения, определяющие основной шаг $\alpha = 2\pi/m$, осуществляются РИ. Дробный шаг получен с помощью реверсивного счетчика (РС). При поступлении сигнала $k = 0, 1, 2, \dots, \nu$, где ν – коэффициент дробления шага, изменяется код числа, зафиксированного в РС. Преобразователи ПКА1, ПКА2 преобразуют этот код в аналоговые сигналы, задающие токи переключаемых обмоток в соответствии с выражениями (6.1).

Обмотки ОУ1, ОУ3 и ОУ2, ОУ4 работают в противофазе. Для каждой пары обмоток используется один ключ К2 и один резистор обратной связи $R_{o.c.}$.

Пусть, например, требуется получить значения токов в обмотках ОУ1 и ОУ2, равные I_{31} и I_{32} . Эти токи задаются аналоговыми сигналами на выходе преобразователей код-аналог. Если реальный ток $i_1 < I_{31}$, то включаются ключи К1, К2 и ток в цепи $+U - K2 - OY1 - K1 - R_{o.c.} - 0$ растет. Поддержива-

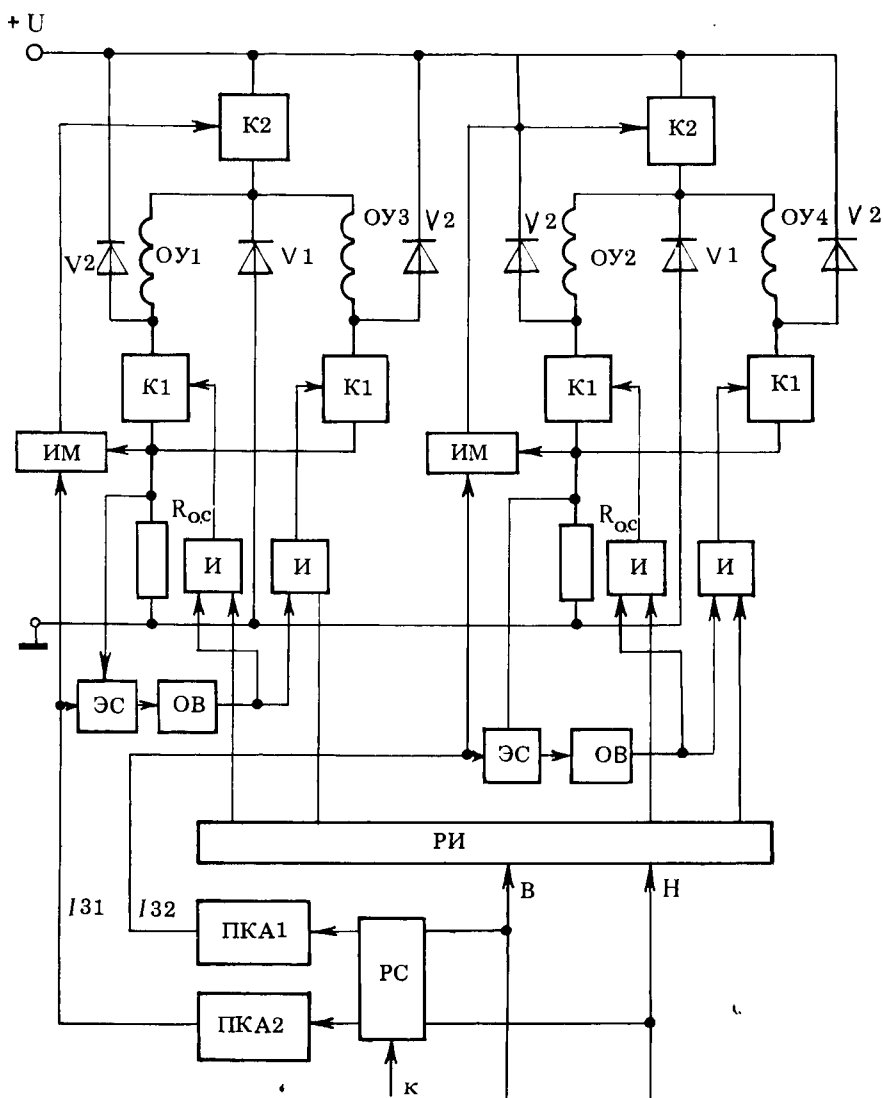


Рис. 6.2. Шаговый привод с электрическим дроблением шага.

ние силы тока на заданном уровне осуществляется импульсным модулятором (ИМ). Если $i_1 > I_{31}$, ключ K2 закрывается и ток i_1 затухает в цепи YO1 — K1 — R_{oc} — V1 — OY1. Если $i_1 \gg I_{31}$, то для ускорения спада тока до требуемого значения по сигналу, получаемому от элемента сравнения (ЭС), срабатывает одновибратор (ОВ), нарушается совпадение сигналов на входе схемы И и при отключенном K2 отключается K1. Теперь ток в обмотке OY1 протекает по цепи OY1 — V2 — (+U) — 0 — V1 — OY1.

6.2.3. Многозаходная коммутация

Для многофазных ШД ($m > 3$) возможна многозаходная коммутация с увеличением основного или дробного шага в целое число раз. Для многозаходной коммутации $\alpha = 2\pi S/n$, где S — число заходов в цикле; n — число тактов (состояний) в цикле; $n = m$ при симметричной коммутации и $n = 2m$ при несимметричной.

Приведем примеры многозаходных циклов:

а) при $m = 4$, несимметричной коммутации, $n = 8$, $S = 3$, $\alpha = 3\pi/4$:

(1) — (23) — (4) — (12) — (3) — (41) — (2) — (34) — (1) — ... ;

б) при $m = 5$, симметричной коммутации, $n = 5$, $S = 2$, $\alpha = 4\pi/5$:

(1) — (3) — (5) — (2) — (4) — (1) — ... ;

в) при $m = 5$, несимметричной коммутации, $n = 10$, $S = 3$, $\alpha = 3\pi/5$:

(1) — (23) — (4) — (51) — (2) — (34) — (5) — (12) — (3) — (45) — (1) — ... или (512) — (23) — (345) — (51) — (123) — (34) — (451) — (12) — (234) — (45) — (512) — ...

Различные способы коммутации могут быть наглядно представлены годографами вектора намагничивающих сил или вектора напряжения, примененного к обмоткам ШД (рис. 6.3). На рис. 6.3, а1, а2, б1, б2, в1, в2, в3 приведены годографы вектора напряжения при симметричном управлении с основным шагом $\alpha = 2\pi/m$, на рис. 6.3, а3, б3, в4, в5 — годографы при несимметричном управлении с дробным шагом $\alpha = \pi/m$ и на рис. 6.3, б4, в6, в7 — годографы при многозаходных циклах управления.

Электромагнитный момент ШД может быть вычислен как производная от электромагнитной энергии поля ШД:

$$M(\theta) = \frac{dW_{\text{э}}}{d\theta_{\text{м}}} = p \frac{dW_{\text{э}}}{d\theta}, \quad (6.2)$$

где $\theta_{\text{м}}$ — механический угол поворота ротора; θ — электрический угол поворота вектора намагничивающей силы; p — число пар полюсов активного ротора.

В положениях ротора, в которых запас электромагнитной энергии имеет экстремальные значения (максимум или минимум), электромагнитный момент равен нулю (рис. 6.4). При этом положение, соответствующее максимуму $W_{\text{э}}$, является точкой устойчивого равновесия (точка 0). Если угловое положение ротора отличается от положения устойчивого равновесия на величину $|\theta| < \pi$, то возникает электромагнитный момент, под действием которого ротор стремится занять положение устойчивого равновесия. В точках $\pm\pi$ электромагнитная энергия минимальна, и момент ШД равен нулю. Однако эти точки являются точками неустойчивого равновесия. При малейшем отклонении от них возникает электромагнитный момент, направленный в сторону увеличения возникшего отклонения.

Равенство (6.2), строго говоря, справедливо лишь при постоянстве токов. Поэтому вычисляемый по (6.2) момент обычно называют *статическим синхронизирующим*.

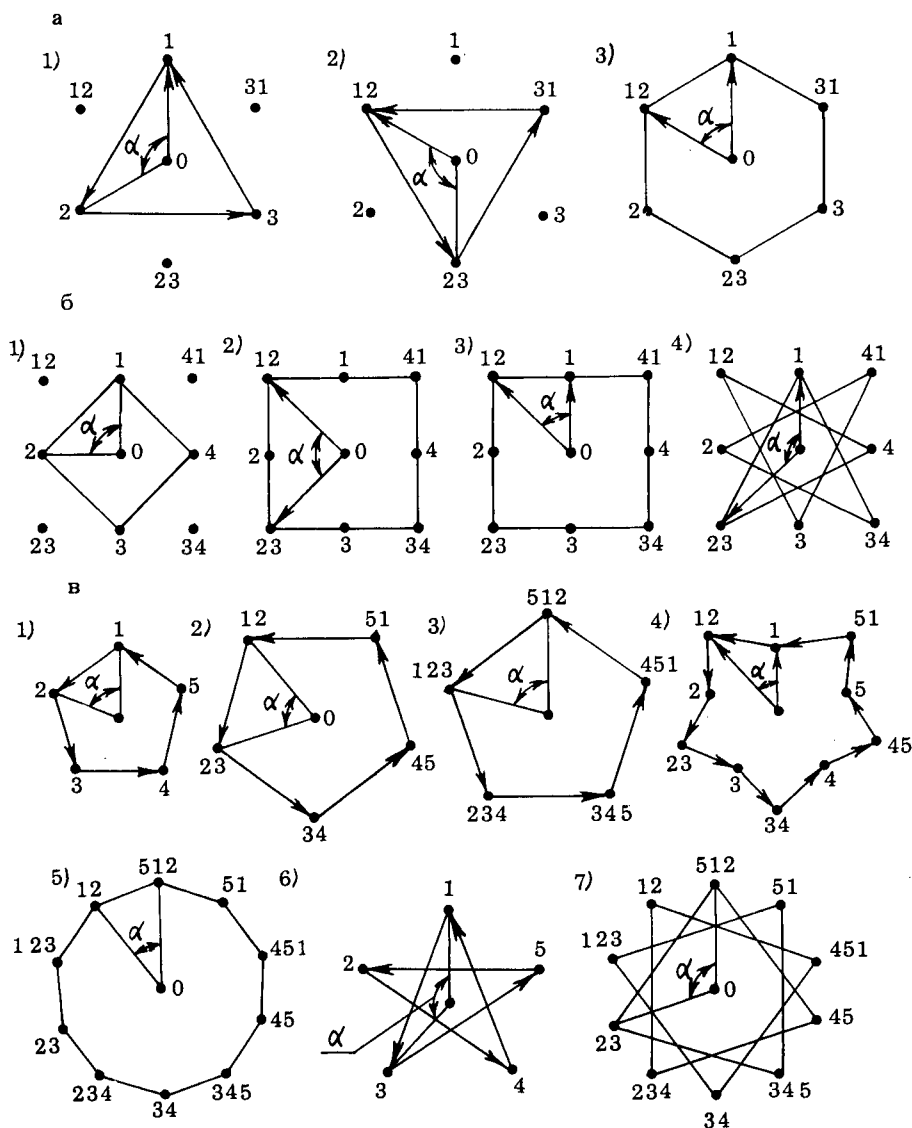


Рис. 6.3. Годографы вектора напряжения ШД.

В общем случае синхронизирующий момент является периодической функцией электрического угла θ поворота ротора из состояния устойчивого равновесия и может быть представлен в виде бесконечного спектра гармоник

$$M(\theta) = \sum_{\nu=1}^{\infty} M_{\nu} \sin(\nu\theta + \varphi_{\nu}),$$

где φ_{ν} , M_{ν} — начальная фаза и амплитуда ν -й гармоники.

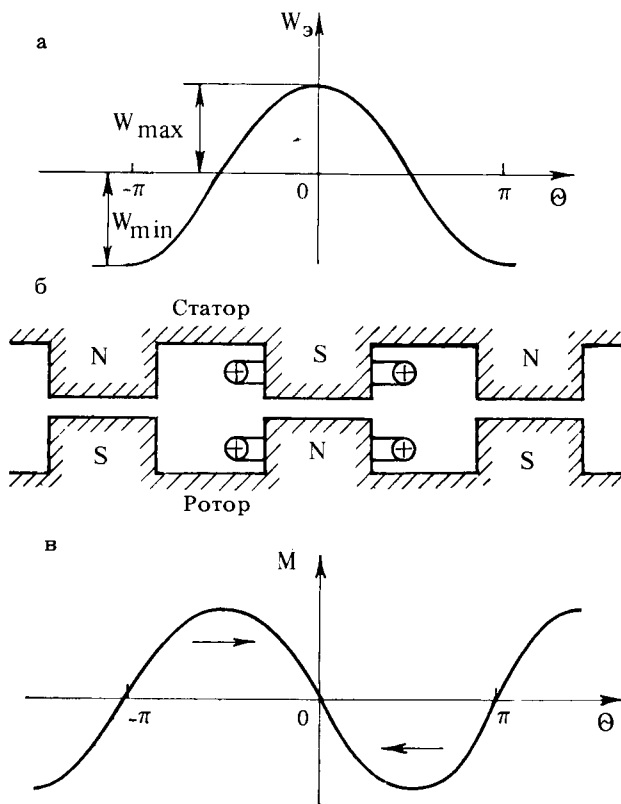


Рис. 6.4. Угловые характеристики ШД:

а – зависимость электромагнитной энергии ШД с активным ротором от углового положения ротора; *б* – положение устойчивого равновесия при статическом моменте нагрузки $M_{\text{ст}} \Rightarrow 0$; *в* – зависимость синхронизирующего момента от углового положения ротора.

Для упрощения расчетов часто ограничиваются рассмотрением процессов при наличии только одной основной гармоники. Если выбрать начало координат в точке 0 устойчивого равновесия при моменте нагрузки $M_{\text{ст}} = 0$, то для исходного электрического состояния (рис. 6.5, кривая 1) $M = -M_{\text{max}} \sin \theta$.

Если теперь произвести переключение фаз ШД, то характеристика синхронизирующего момента сместится на угол $\alpha = 2\pi/n$, где $n = m$ при симметричном и $2m$ при несимметричном управлении (рис. 6.5, кривая 2). При наличии статического момента $M_{\text{ст}}$ переход в новое положение устойчивого равновесия возможен при условии $\vartheta_1 > \vartheta_2$, где $\vartheta_1 = \theta_1 - \alpha = -\arcsin \frac{M_{\text{ст}}}{M_{\text{max}}} - \alpha$; $\vartheta_2 = -\pi + \arcsin \frac{M_{\text{ст}}}{M_{\text{max}}}$, откуда $M_{\text{ст}} < M_{\text{max}} \cos \frac{\alpha}{2}$.

Запас устойчивости ШД φ_y выражается в долях электрического шага:

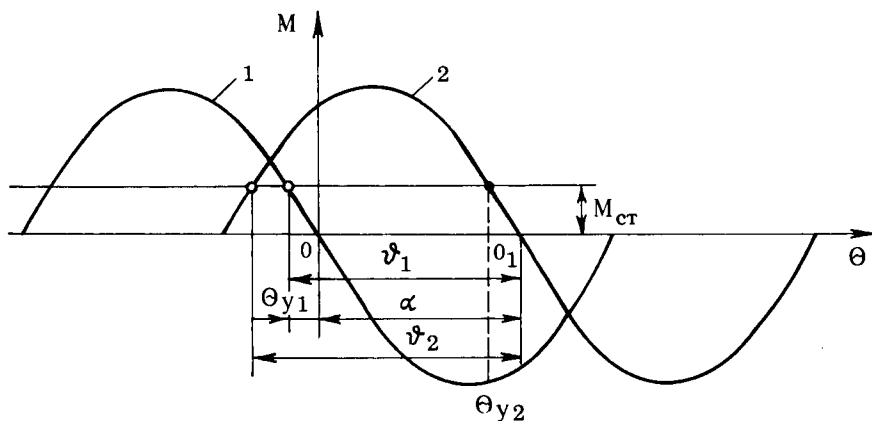


Рис. 6.5. Синхронизирующий момент $M = f(\theta)$ для двух соседних электромагнитных состояний и условие перехода ротора из положения θ_{y1} в новое положение устойчивого равновесия θ_{y2} .

$$\varphi_y = \pm (\pi - \alpha) = \pm \pi \frac{n-2}{n}. \quad (6.3)$$

Из (6.3) видно, что наименьшее число n тактов коммутации симметричных ШД равно трем. При $n = 2$ независимо от формы кривой $M(\theta)$ запас устойчивости оказывается равным нулю.

6.2.4. Обобщенные параметры шагового привода

При малых отклонениях от положения устойчивого равновесия для оценки механической подвижности системы используют частоту собственных круговых колебаний ротора ω_0 .

В соответствии со статической характеристикой при малых отклонениях θ от состояния устойчивого равновесия приближенно полагают

$$M(\theta) = -M_{\max} \sin \theta = -M_{\max} \sin p \theta_{\max},$$

где p — число пар полюсов; $\theta_{\max}$ — геометрический угол отклонения ротора.

При отсутствии нагрузки на валу ШД ($M_c = 0$) уравнение движения совпадает с уравнением математического маятника

$$J \ddot{\theta}_M + M_{\max} \sin p \theta_M = 0,$$

где J — момент инерции привода.

Вследствие малости угла θ_M в окрестности точки $\theta_M = 0$:

$$\sin p \theta_M = p \theta_M; \quad \ddot{\theta} + p \frac{M_{\max}}{J} \theta = 0, \quad (6.4)$$

Решение дифференциального уравнения (6.4) при начальных условиях $t =$

$$= 0, \theta = \theta_0, \dot{\theta} = 0:$$

$$\theta = \theta_0 \cos \omega_0 t,$$

при этом $\dot{\theta} = -\theta_0 \omega_0 \sin \omega_0 t$, где ω_0 — частота собственных круговых колебаний ротора:

$$\omega_0 = \sqrt{p \frac{M_{\max}}{J}}.$$

Длительность периода собственных колебаний определяется равенством

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{pM_{\max}}}.$$

В более общем случае при несинусоидальной характеристике $M(\theta)$ и при $M_c \neq 0$

$$\omega_0 = \sqrt{k/J},$$

где k — жесткость характеристики $M(\theta)$ в точке устойчивого равновесия ($\theta = \theta_{\text{уст}}$):

$$k = - \left(\frac{dM(\theta)}{d\theta} \right)_{\theta = \theta_{\text{уст}}}.$$

Электромагнитные постоянные времени обмоток ШД определяют длительность электромагнитных переходных процессов.

Для ШД индукторного и реактивного типов индуктивность переключаемых контуров является периодической функцией положения ротора. Для характеристики инерционности контуров различают постоянную времени T_0 , обусловленную средним значением индуктивности контура L_0 , и постоянную T_1 , определяемую амплитудой L_1 основной гармоники индуктивности: $T_0 =$

$$= \frac{L_0}{k_\phi R}; T_1 = \frac{L_1}{k_\phi R_1}. \text{ Здесь } k_\phi \text{ — коэффициент форсировки, учитываю-}$$

щий наличие в контуре, кроме сопротивления R , фазы ШД, дополнительного сопротивления $R_{\text{доп}}$, $k_\phi = (R + R_{\text{доп}}) / R$.

Соотношения между T_0 и T_1 и их абсолютные значения зависят от геометрии зубцового слоя и насыщения магнитной системы. Для магнитоэлектрических ШД постоянные времени обмоток малы и определяются главным образом потокоцеплениями рассеяния (как T_0).

Электромагнитные постоянные времени T часто измеряют в долях периода собственных колебаний T_c :

$$x = T/T_c = T\omega_0/(2\pi) = Tf_0,$$

где $f_0 = \omega_0/2\pi$ — собственная частота ШД.

Введем относительную частоту коммутации обмоток ШД $f_* = f/f_0$. При $x \leq 0,5$ и $f_* \geq 0,5$ влияние электромагнитных переходных процессов на поведение шагового привода незначительно.

Внутреннее электромагнитное демпфирование является одним из существенных факторов, определяющих движение ротора ШД.

Если пренебречь электромагнитными переходными процессами, то ток во включенных фазах ШД определяется равенством

$$i = \frac{U_\delta - e}{R} = \frac{U_\delta - \psi_{\max} \omega}{R},$$

где U_δ — базисное напряжение, определяемое как модуль геометрической суммы напряжений возбужденных фаз, приведенный к числу фаз $m = 2$, $U_\delta = \frac{2}{m} (U_1 + U_2 + \dots + U_m)$; $\psi_{\max}$ — амплитуда изменения потокосцепления ротора с фазой статора при изменении углового положения ротора θ ; $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ — скорость вращения ротора в электрических радианах; $e = \psi_{\max} \omega$ — ЭДС в фазе (контуре) двигателя; R — активное сопротивление фазы статора.

Электромагнитный момент двигателя можно представить в виде

$$M = \psi_{\max} i = \psi_{\max} \frac{U_\delta}{R} (1 - \delta \frac{\omega}{\omega_0}),$$

где $\delta = (\psi_{\max} \omega_0)/U_\delta$ является безразмерным параметром внутреннего демпфирования; ω_0 — круговая частота собственных колебаний.

Результирующий электромагнитный момент можно представить как разность моментов синхронизирующего M_c и демпфирующего M_d :

$$M = M_c - M_d = M_c - D \frac{d\theta}{dt},$$

где $D = (\delta M_c)/\omega_0 = \psi_{\max}^2/R$ — коэффициент внутреннего демпфирования.

Приемистость ШД измеряется предельной частотой управляющих импульсов f_n , при которой ротор ШД с нагрузкой типа трения входит в синхронизм без потери информации. Наибольшая приемистость достигается при пуске без нагрузки при питании обмоток ШД от источника тока. При этом $f_{n0} = (m_1 \omega_0)/\pi$, где m_1 — число тактов коммутации.

Предельная пусковая скорость холостого хода

$$\omega_{n0} = \alpha_m f_{n0} = 2\omega_0/p.$$

С увеличением нагрузки частота приемистости f_n снижается. При торможении нагрузка в виде реактивного момента, наоборот, позволяет увеличить допустимый перепад частот.

Наиболее тяжелым условием для шагового привода является необходимость торможения или реверса в переходных режимах, когда скорость ротора после предыдущей команды "Пуск" еще не установилась.

Обычно предельная частота управляющих импульсов для реверса с установившейся скорости составляет $f_{\text{пр}} = (0,4 - 0,8) f_{\text{п}}$, а в переходных режимах $f_{\text{пр}} = (0,2 - 0,4) f_{\text{п}}$.

При отработке больших перемещений применяют работу ШД на частоте выше частоты приемистости. Для выхода на максимальную частоту f_{max} сначала производят пуск двигателя при частоте порядка $0,8 f_{\text{п}}$, а затем плавно увеличивают частоту до заданного значения f_{max} . Остановку ШД, набравшего скорость, соответствующую частоте $f_{\text{max}} > f_{\text{п}}$, осуществляют путем постепенного плавного или ступенчатого снижения частоты, причем величина ступеней не должна превышать $0,4 f_{\text{п}}$.

6.3. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

6.3.1. Основные элементы шагового привода

Функциональная схема, поясняющая взаимосвязь основных элементов шагового привода, показана на рис. 6.6. Входной сигнал $U_{\text{вх}}$ задает требуемое перемещение рабочего органа, связанного с ротором шагового двигателя ШД. Преобразователь (П) преобразует непрерывный сигнал $U_{\text{вх}}$ в частотно-модулированную последовательность импульсов напряжения. Полученные на выходе П импульсы калибруются формирователем импульсов (ФИ), который придает выходным импульсам прямоугольную форму и необходимую длительность. Распределитель импульсов (РИ) преобразует унитарный код в m -фазную систему прямоугольных импульсов напряжения. Усилитель мощности (УМ) усиливает импульсы, вырабатываемые РИ, и подает их в определенной последовательности на обмотки ШД. В качестве усилителей мощности применяют транзисторные и тиристорные усилители, векторные элементы которых работают в режиме переключений. Требуемое напряжение на фазах ШД формирует регулятор напряжения (РН), который управляется вычислительным устройством (ВУ) в соответствии со входным сигналом $U_{\text{вх}}$.

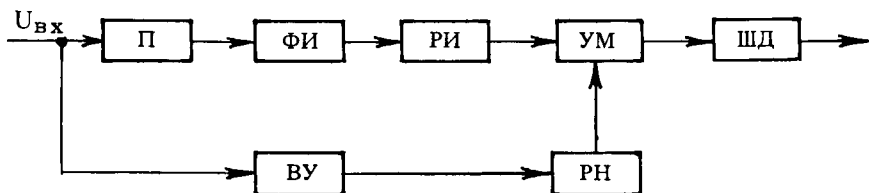


Рис. 6.6. Типовая функциональная схема шагового привода.

6.3.2. Распределители импульсов

РИ должны осуществлять распределение импульсов по заданному закону при минимальном числе элементов, длительно сохраняя предыдущее состояние при отсутствии нового управляющего (входного) импульса. При реверсировании распределителя импульсов не должно происходить потери информации. В качестве распределителя импульсов обычно используют многостабильные транзисторные схемы, содержащие транзисторные ключи (К), логические схемы совпадения (И), линии задержки (ЛЗ) и диоды (Д). На рис. 6.7 приведена структурная схема четырехтактного распределителя импульсов. Возможные состояния РИ удобно представить в виде матрицы состояния, размерность которой $n \times n$, где n — число тактов коммутации:

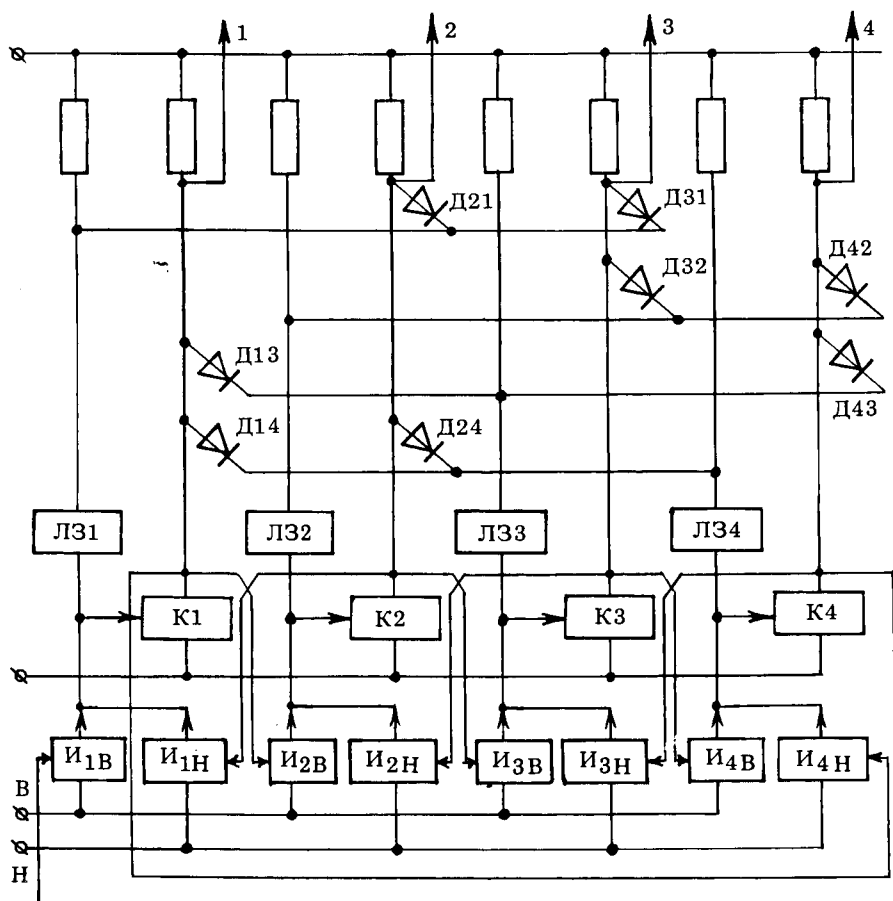


Рис. 6.7. Структурная схема четырехтактного распределителя импульсов.

$$C_{\nu}^n = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & 1 & 2 & \dots & n \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline c_{11} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline c_{12} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \dots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline c_{1n} \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline c_{21} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline c_{22} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \dots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline c_{2n} \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline \vdots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \vdots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \dots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \vdots \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline c_{n1} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline c_{n2} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \dots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline c_{nn} \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{ключи } i \\ \downarrow \\ \text{состояния } j \end{array} \quad (6.5)$$

В (6.5) ν — число одновременно включенных ключей; i — номер ключа; j — номер состояния. Обычно полагают, что если элемент матрицы $C_{ij} = 0$, то ключ i в состоянии j замкнут.

Так, для цикла 1–2–3–4–1 ... матрица состояний имеет вид

$$C_1^4 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array}$$

Для цикла 12–23–34–41 ...

$$C_2^4 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array}$$

Для правильного чередования состояний РИ содержит группу диодов, схема соединения которых может быть представлена диодной матрицей:

$$D_{\nu}^n = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & 1 & 2 & \dots & n \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline d_{11} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline d_{12} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \dots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline d_{1n} \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline d_{21} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline d_{22} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \dots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline d_{2n} \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline \vdots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \vdots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \dots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \vdots \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline d_{n1} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline d_{n2} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \dots \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline d_{nn} \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array} \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ i \\ \rightarrow j \end{array}$$

Здесь i — номер ключа, j — номер линии задержки. При наличии диода, связывающего выход i -го ключа со входом j -й линии задержки, элемент $d_{ij} = 1$.

Для осуществления четырехтактной матрицы состояний C_1^4 диодная матрица имеет вид

$$D_1^4 = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

Включение диодов, соответствующее этой матрице, показано на рис. 6.7.

Для реализации четырехтактного цикла состояний C_2^4 необходимо включить диоды в соответствии с матрицей

$$D_2^4 = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array}$$

Для этого необходимо удалить из схемы, представленной на рис. 6.7, диоды $D_{14}, D_{21}, D_{32}, D_{43}$, оставив только $D_{13}, D_{24}, D_{31}, D_{42}$.

В этом случае при открытых ключах К1 и К2 ключи К3 и К4 запираются сигналами, поступающими через диоды D_{13}, D_{24} . Распределитель фиксирует состояние 2 с включенными фазами 1 и 2. При поступлении следующего импульса "Вперед" (В) управляющие сигналы проходят через схемы совпадения $I_{2В}, I_{3В}$ и отпирают ключи К2, К3. Ключ К1 запирается сигналом, поступающим через диод D_{31} , и распределитель фиксирует состояние 3. Последующие импульсы производят дальнейшие переключения в соответствии с матрицей состояний C_2^4 .

Аналогично с помощью диодных матриц и матриц состояний могут быть построены схемы многотактных распределителей для ШД с различным числом фаз и циклом коммутации. При этом широко используются унифицированные логические блоки и микросхемы на импульсных или потенциально-импульсных элементах.

6.4. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Состояние ШД определяется величиной токов в его обмотках и значениями потокоцеплений или индуктивностей контуров. Число электрических контуров ШД в общем случае равно $m+1$ (m фаз и одна обмотка возбуждения). В случае возбуждения постоянными магнитами для общности рассматривают фиктивную обмотку возбуждения с сопротивлением, равным нулю. Через эту обмотку протекает ток, создающий постоянную намагничивающую силу

возбуждения. Если пренебречь насыщением магнитной цепи и полагать, что индуктивность контуров зависит только от углового положения ротора, то уравнения, описывающие поведение ШД, можно представить в виде:

$$Ri_j + \sum_{k=1}^{m+1} L_{jk} \frac{di_k}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \sum_{k=1}^{m+1} i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta} = U_j;$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, m+1; \quad (6.6)$$

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_c = \frac{p}{2} \sum_{j=1}^{m+1} \sum_{k=1}^{m+1} i_j i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta},$$

где $\sum_{k=1}^{m+1} L_{jk} \frac{di_k}{dt}$ — ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции в j -м контуре;

$\frac{d\theta}{dt} \sum_{k=1}^{m+1} i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta}$ — ЭДС вращения j -го контура; $\frac{p}{2} \sum_{j=1}^{m+1} \sum_{k=1}^{m+1} i_j i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta}$ —

электромагнитный момент ШД; J — момент инерции привода; θ — угол поворота ротора из исходного положения в электрических радианах; R — сопротивление контура.

В частном случае для двухфазного ($m = 2$) магнитно-электрического ШД индексы $k = 1$ и $k = 2$ относятся к фазам двигателя, а индекс $k = 3$ к фиктивной обмотке возбуждения с током $I_3 = \text{const}$. Для неявнополюсного двигателя зубчатость статора для упрощения не учитывается. При этом распределение магнитной индукции на двойном полюсном делении синусоидальное. Примем за начало отсчета угла θ положение ротора, при котором потокосцепление ротора с фазой 2 имеет максимальное значение. При этом можно положить $L_{11} = L_{22} = L = \text{const}$; $L_{33} = L = \text{const}$; $L_{12} = 0$; $L_{23} = L_{32} = L_{\max} \cos\theta$; $L_{13} = L_{31} = L_{\max} \sin\theta$; $\psi_m = I_3 L_m$. Подставив данные значения в (6.6), получим:

$$Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + \psi_{\max} \cos\theta \frac{d\theta}{dt} = U_1;$$

$$Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} - \psi_{\max} \sin\theta \frac{d\theta}{dt} = U_2;$$

$$i_3 = I_3 = \text{const};$$

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_c = p \psi_{\max} (i_1 \cos\theta + i_2 \sin\theta).$$

Для трехфазного трехстаторного ШД с безобмоточным ротором ток возбуждения равен нулю, $m = 3$, число пар полюсов равно числу зубцов ротора $p =$

$= z_p$. Пренебрегая высшими гармониками магнитного потока, получаем индуктивности фаз:

$$\begin{aligned} L_{11} &= L_0 + L_1 \cos \theta; \\ L_{22} &= L_0 + L_1 \cos (\theta - 2\pi/3); \\ L_{33} &= L_0 + L_1 \cos (\theta + 2\pi/3). \end{aligned} \quad (6.7)$$

Взаимные индуктивности фаз для трехфазного двигателя равны нулю: $L_{12} = L_{23} = L_{31} = 0$. Для реверсивного ШД контур возбуждения отсутствует. Поэтому в (6.6) верхние пределы индексов суммирования равны числу фаз m . После подстановки (6.7) в (6.6) получим:

$$Ri_k + L_{kk} \frac{di_k}{dt} - L_1 i_k = \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} (k-1) \right) \frac{d\theta}{dt} = U_k, \quad k = 1, 2, 3; \quad (6.8)$$

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + M_c = - \frac{z}{2} L_1 \sum_{k=1}^3 i_k^2 \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} (k-1) \right).$$

Обычно в (6.8) $L_0 \gg L_1$. Поэтому в (6.8) приближенно полагают ЭДС самоиндукции фаз не зависящей от угла поворота ротора: $e_{Lk} = L_0 \frac{di_k}{dt}$.

Токи в фазах при питании ШД от источника тока принимаются заданными, и рассматривается только одно уравнение моментов.

6.5. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

6.5.1. Обработка единичного шага

Процесс обработки единичного шага показан на рис. 6.8. В начальный момент $t = 0$ ротор двигателя находится в положении $\theta = 0$, соответствующем устойчивому положению равновесия после обработки предыдущего шага. При отсутствии момента нагрузки $M_{\text{сн}} = 0$ этому положению соответствует момент $M_0 = 0$ на кривой синхронизирующего момента предыдущего шага. При переключении обмоток ШД полагаем (с некоторым приближением), что синхронизирующий момент мгновенно приобретает значение $M_{\text{нач}}$, и ротор приходит в движение. Скорость движения $d\theta/dt$ и запас кинетической энергии ΔW_k возрастают, и одновременно уменьшается электромагнитный момент $M(\alpha - \theta)$. При $t = t_A$ угол поворота ротора θ становится равным заданному шагу α , а синхронизирующий момент — нулю (точка A). Кинетическая энергия ротора достигает максимальной величины:

$$\Delta W_{kA} = \frac{1}{2} J (\dot{\theta}_{\text{max}})^2 = \int_0^{\alpha} M(\alpha - \theta) d\theta. \quad (6.9)$$

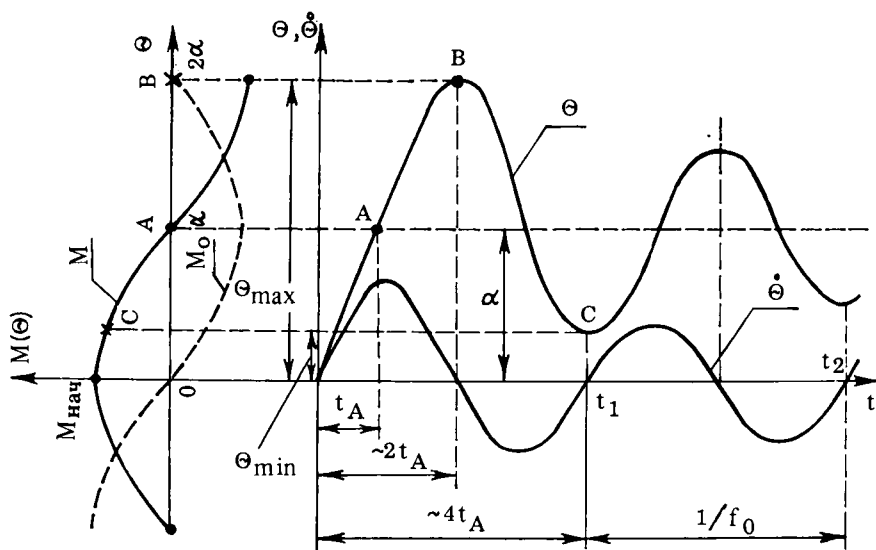


Рис. 6.8. Временные диаграммы при отработке единичного шага и характеристики синхронизирующего момента ШД

Дальнейшее движение от точки A к точке B происходит за счет уменьшения кинетической энергии. При этом преодолеваются отрицательный синхронизирующий момент и момент внутреннего демпфирования. В точке B ($t \cong \cong 2t_A$) скорость $\dot{\theta}$ становится равной нулю, а угол поворота ротора $\theta = \theta_{\max}$. Приращение электромагнитной потенциальной энергии при движении от точки A к точке B

$$\Delta W_{\text{э}B} = - \int_{\alpha}^{\theta_{\max}} M(\alpha - \theta) d\theta.$$

Часть кинетической энергии расходуется на электрические потери и потери на трение. Поэтому $\theta_{\max} < 2\alpha$.

Под действием отрицательного синхронизирующего момента происходит разгон двигателя в обратном направлении от точки B к точке A . В точке A синхронизирующий момент становится равным нулю ($M_A = 0$) и затем меняет знак, но движение продолжается по инерции до точки C , пока не будет израсходован весь запас кинетической энергии. В момент $t_1 \cong 4t_A$ заканчивается первый период колебаний ротора и начинается второй. Колебания ротора постепенно затухают, и ротор принимает устойчивое положение, соответствующее точке A (угол $\theta = \alpha$), когда полностью израсходуется энергия, введенная в систему при переключении обмоток (см. (6.9)).

Период колебаний t_1 приблизительно определяется собственной частотой колебаний $t_1 = 2\pi/\omega_0 = 1/f_0 \cong 4t_A$.

Из-за наличия колебаний полное время отработки шага во многих случаях (например, при отсутствии статической нагрузки) может в десятки раз превосходить время t_a , затрачиваемое на первоначальный поворот ротора на угол, равный одному шагу α . Поэтому при отработке единичных шагов применяют стартстопный режим управления, позволяющий устранить колебания ротора.

6.5.2. Характерные диапазоны частоты команд

При отработке серии шагов начальные условия для выполнения данного шага определяются состоянием ШД в конце предыдущего шага, которое, в свою очередь, зависит от частоты управляющих импульсов.

Известны четыре характерных диапазона частоты f :

- 1) высокие частоты $f > 1/t_a$ или $f > 4f_0$;
- 2) средние частоты $1/(2t_a) \leq f \leq 1/t_a$ или $2f_0 \leq f \leq 4f_0$;
- 3) низкие частоты $1/t_{\text{усп}} < f < 1/(2t_a)$; $f_{\text{ед}} < f < 2f_0$;
- 4) единичные команды $0 < f \leq 1/t_{\text{усп}}$; $0 < f \leq f_{\text{ед}}$, $f_{\text{ед}} = 1/t_{\text{усп}}$, где $t_{\text{усп}}$ — время успокоения колебаний.

В области высоких частот ротор в процессе пуска сначала отстает от поля. После первого переключения ротор повернется на угол $\theta_1 < \alpha$, и в этот момент произойдет новое переключение обмоток. С ростом динамической ошибки увеличивается количество энергии, вводимой в систему, и возрастает ускорение ротора. В конечном счете при частоте $f < f_n$ максимальное рассогласование магнитных осей статора и ротора не превосходит одного полюсного деления, движения ротора становятся синхронными, и возникающие в процессе пуска колебания постепенно затухают.

В полосе средних частот $2f_0 \leq f \leq 4f_0$ условия пуска наиболее легкие. Очередная команда подается после того, как ротор в результате выполнения предыдущей команды повернется на угол, лежащий в пределах $\alpha < \theta < \theta_{\text{max}}$ (участок AB на рис. 6.8). В частности, если $f = 2f_0$ и $\theta = \theta_{\text{max}} = 2\alpha$, то очередное переключение не вводит дополнительной энергии в систему. Такое переключение только подтверждает положение устойчивого равновесия ротора. При этом устанавливается периодический режим, согласно которому в течение нечетных тактов коммутации ротор поворачивается на два шага ($\theta = 2\alpha$), а в течение четных тактов остается неподвижным, фиксируя достигнутое положение.

В диапазоне низких частот наиболее неблагоприятным является случай $M_c = 0, f = f_0$. Вторая команда поступает в момент, когда двигатель находится в состоянии C . При этом в систему вводится значительная избыточная энергия и возникающие колебания имеют амплитуду, близкую к удвоенному шагу. Из-за нелинейности характеристики $M(\theta)$ период колебаний возрастает с увеличением амплитуды. Поэтому для шагового привода выделяют полосу резонансных частот, ширина которой растет с увеличением электрического шага $\alpha = 2\pi/n$, где n — число тактов коммутации. Одновременно увеличивается и амплитуда резонансных колебаний.

Единичные команды (диапазон очень низких частот $f < f_{\text{ед}}$) характеризуется тем, что отработка каждого шага начинается при нулевых начальных условиях. При $t = 0$ $\theta = 0, \dot{\theta} = 0$.

6.5.3. Стартстопное управление

Стартстопным называется такое управление ШД, при котором обеспечивается минимальная динамическая ошибка за счет использования избытка энергии, вводимой в систему для устранения колебаний ротора. Для этого необходимо, чтобы энергия, запасенная ротором при разгоне, была полностью израсходована в процессе торможения. Торможение в конце шагового перемещения может быть принудительным или естественным.

На рис. 6.9 показаны приближенные характеристики синхронизирующего момента $M(\theta)$ для ШД с четырехтактной коммутацией. Когда ротор находится в состоянии $\theta = 0$, обмотки статора включаются так, что в двигателе возникает электромагнитное состояние, которому соответствует характеристика 1 синхронизирующего момента. Под влиянием избыточного момента $M - M_c$ происходит разгон ротора и накопление кинетической энергии. В момент, когда ротор повернется на угол $\theta = \theta_1$, производится переключение обмоток. В результате синхронизирующий момент определяется характеристикой 4, для которой положение устойчивого равновесия совпадает с углом $\theta = 0$.

При дальнейшем движении ротора происходит торможение противовключением. Запасенная ротором кинетическая энергия расходуется на преодоление момента нагрузки M_c и момента торможения, соответствующего характеристике 4. Когда ротор повернется на величину заданного шага $\theta = \alpha$, его кинетическая энергия должна быть равна нулю. В этот момент ШД снова переключается на характеристику 1. Но положение $\theta = \alpha$ является для характеристики 1 положением устойчивого равновесия, и поэтому (при реактивном моменте M_c) движение ротора прекращается. При соответствующем выборе угла переключения θ_1 колебания ротора могут быть полностью исклю-

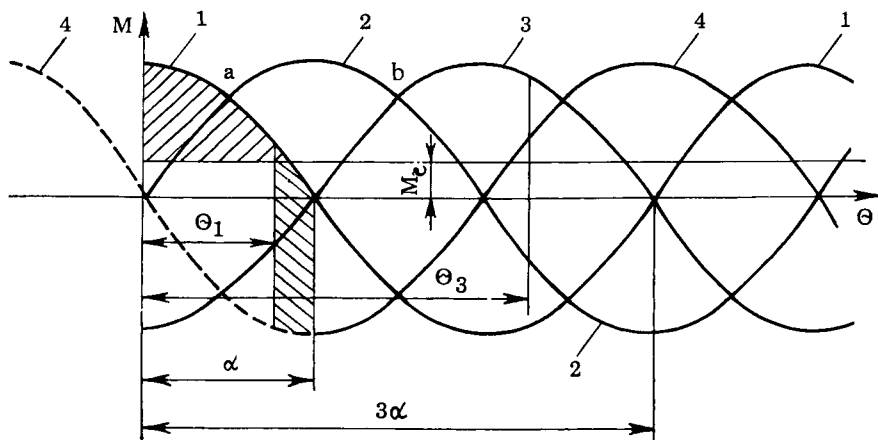


Рис. 6.9. Стартстопное управление ШД с принудительным торможением.

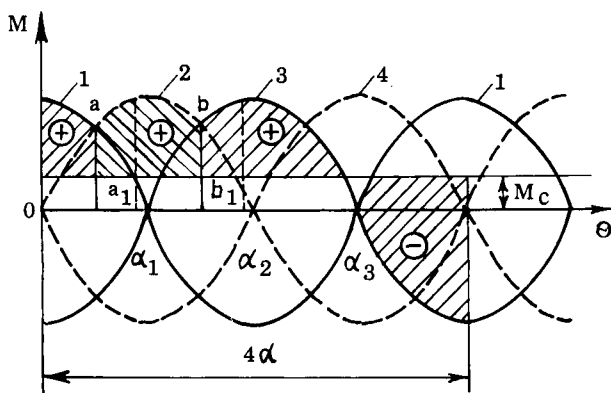


Рис. 6.10. Стартстопное управление с естественным торможением.

ченны. Стартстопное управление может осуществляться и при отработке нескольких шагов. Так, при отработке перемещения, состоящего из трех шагов, переключения с характеристики 1 на характеристику 2, а затем с характеристики 2 на характеристику 3 могут быть для повышения быстродействия произведены в точках a и b (см. рис. 6.9).

В положении $\theta = \theta_3$ производится обратное переключение с характеристики 3 на характеристику 2. В результате на участке $\theta_3 < \theta < 3\alpha$ происходит торможение противовключением, и скорость движения уменьшается до нуля. При $\theta = 3\alpha$ снова включается характеристика 3, и ШД фиксирует это положение. Стартстопное управление с естественным торможением поясняется примером на рис. 6.10. Здесь показан процесс отработки четырех шагов ($\theta = 4\alpha$). В начальном положении ротора $\theta = 0$ включаются обмотки ШД, создающие момент, изменяющийся по характеристике 1. Ротор двигателя приходит в движение. Переключение на характеристики 2 и 3 происходит соответственно в точках a и b по условию максимального быстродействия. Переключение на характеристику 4 происходит в конце движения, когда $\theta = 4\alpha$. На этой характеристике ШД не производит механической работы, а только фиксирует заданное положение.

Таким образом, при отработке заданного малого числа шагов $n \leq n_{ц}$, где $n_{ц}$ — число тактов коммутационного цикла ШД, $(n - 1)$ начальных шагов производятся ускоренно с накоплением кинетической энергии. Последний n -й шаг осуществляется на $(n - 1)$ -й характеристике в тормозном режиме.

Для полного исключения колебаний ротора необходимо так подобрать моменты переключения характеристик, чтобы положительные и отрицательные площади были одинаковы (см. знаки "+" и "-"). Если при переключении в точках a и b положительная площадь окажется больше отрицательной, то можно сдвинуть точки переключения, например, в a_1, b_1 .

6.5.4. Классификация режимов работы привода с ШД

Режимы работы шагового привода можно классифицировать по выполняемой функции, по видам управляющих команд и движения.

В зависимости от выполняемой функции различают три основных режима: 1) запоминания, или фиксации координат; 2) поворота ротора, или позиционирования исполнительного механизма, состоящего в обеспечении суммарного перемещения рабочего органа на требуемое число шагов; 3) слежения, или синхронно-синфазного движения, состоящего в воспроизведении закона движения, задаваемого последовательностью импульсов управления.

В зависимости от вида управляющих команд возможны режимы: 1) управления цифровым кодом с изменением частоты команд в функции вращения ротора с использованием цепей обратной связи; 2) управления сериями импульсов с изменением частоты команд в функции времени по внешней программе, которое преобразуется в управление длинными сериями, обеспечивающее внезапное изменение скорости, управление короткими сериями, обеспечивающее малые перемещения рабочего органа и режим плавного изменения частоты, позволяющий максимально расширить диапазон рабочих частот ШД.

Основными режимами движения ШД являются: 1) установившийся, или периодический; 2) переходный, или непериодический.

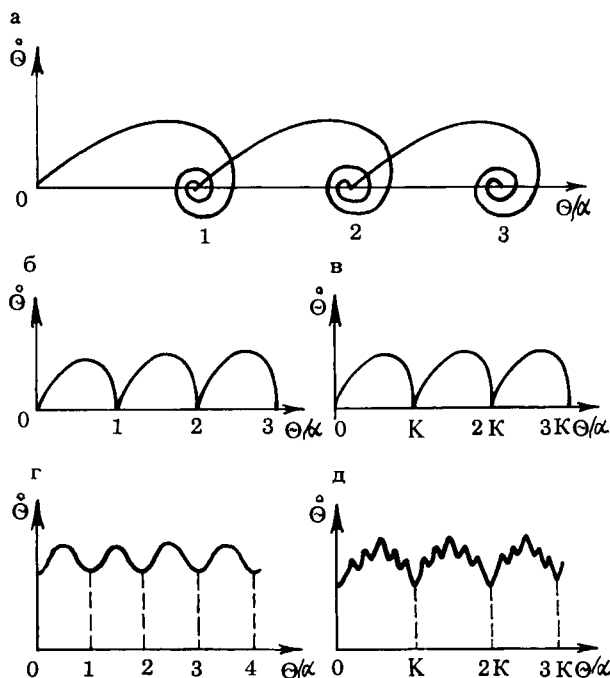


Рис. 6.11. Установившиеся режимы шагового привода.

Условие существования установившегося режима состоит в постоянстве частоты внешних команд $f = \text{const}$. Установившиеся режимы можно подразделить на статические, квазистатические и периодические.

Статический режим характеризуется неподвижным состоянием ротора ($\dot{\theta} = 0$) и относительной угловой ошибкой $\theta_{\text{ст*}} = \theta_{\text{ст}}/a$, где $\theta_{\text{ст}}$ — отклонение ротора от заданного углового положения.

Квазистатический режим состоит в отработке единичных шагов (рис. 6.11, а, б) или коротких серий шагов (рис. 6.11, в). На рис. 6.11, а показана отработка единичных шагов в колебательном режиме. Переход к последующему шагу производится после затухания колебаний на предыдущем шаге. На рис. 6.11, б, в изображена периодическая отработка единичных шагов и серии k шагов при стартопном управлении.

На рис. 6.11, г, д изображены простой и кратный периодические режимы, реализующие движение ротора с постоянной средней скоростью $\omega = 2\pi f = \text{const}$.

6.6. СТРУКТУРЫ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

6.6.1. ШД как элемент (динамическое звено) САУ

Переходные процессы в шаговом приводе (ШП) описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений (6.6). Однако нередко на практике электромагнитные постоянные времени контуров (вследствие применения форсировочных сопротивлений и устройств, ускоряющих затухание токов в фазах) настолько малы, что процесс установления требуемого значения тока происходит практически мгновенно. Обычно при нормированной постоянной времени $\chi \leq 0,5$ электромагнитные переходные процессы не учитываются, и работа ШП описывается упрощенным уравнением

$$\frac{J}{p_{\Pi}} p^2 \theta + Dp\theta + M_c = M_{\max} \sin(\gamma - \theta),$$

где p_{Π} — число пар полюсов ШД; $\gamma = Z\gamma$ — ступенчатая функция, выражающая угловое положение ротора, изменяющееся при задании очередного шага движения; D — коэффициент внутреннего демпфирования.

При малых отклонениях ротора от заданного положения используют операторное уравнение в относительных единицах

$$(ap^2 + bp + 1)\theta = \gamma - \mu_c, \quad (6.10)$$

где $a = J / (p_{\Pi} M_{\max})$; $B = D / M_{\max}$; $\mu_c = M_c / M_{\max}$.

Уравнение (6.10) описывает ШД как звено САУ при условии пренебрежения электромагнитными переходными процессами. Для приближенного учета электромагнитных переходных процессов в передаточную функцию ШД вводится звено чистого запаздывания:

$$W(p) = \frac{\theta(p)}{F(p)} = \frac{e^{Tp}}{ap^2 + bp + 1},$$

где $F(p) = L(\gamma - \mu_c)$.

6.6.2. Основные структуры шаговых приводов

Наиболее простыми являются шаговые приводы с разомкнутой структурой (РШП) с питанием от источника тока или источника напряжения. Структура такого привода дана на рис. 6.12. Управляющий сигнал F_y , определяющий частоту управления, поступает по входам В (вперед) или Н (назад) в РИ, включающий соответствующий канал УМ. При питании шагового двигателя от источника напряжения требуемый уровень тока I_3 в фазах ШД поддерживается с помощью регулятора напряжения (РН), на вход которого подается отклонение тока от заданного значения $\delta I = I_3 - i$. РН представляет собой широтно-импульсный или частотно-импульсный преобразователь.

Приводы, предназначенные для реализации заданного закона изменения скорости, часто выполняются с замкнутой системой управления. На рис. 6.13, а показана замкнутая система ШП с пропорциональным регулированием выходной координаты (например, скорости). Система состоит из РШП, объекта управления (ОУ), содержащего аналоговый датчик регулируемого параметра, преобразователя ПНЧ, преобразующего аналоговый сигнал обратной связи $U_{o.c}$ в последовательность импульсов с частотой f , частотного коммутатора (ЧК) и задающего генератора импульсов G .

ЧК сравнивает заданную частоту f_3 с частотой обратной связи f . Получаемый при этом сигнал с частотой $\Delta f = f_3 - f$ в зависимости от его знака поступает на вход В (вперед) или Н (назад) РИ.

На рис. 6.13, б показана замкнутая система ШП с релейным управлением. Здесь в результате сравнения аналоговых сигналов задания U_3 и обратной связи $U_{o.c}$ образуется сигнал рассогласования δU , поступающий на вход релейного элемента (РЭ), который может быть двух- или трехпозиционным. При двухпозиционном РЭ вырабатываемые генератором G импульсы с постоянной частотой f в зависимости от знака рассогласования поступают на

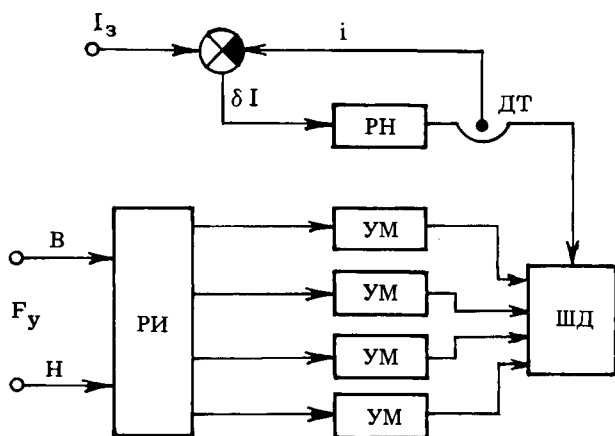


Рис. 6.12. Разомкнутый шаговый электропривод.

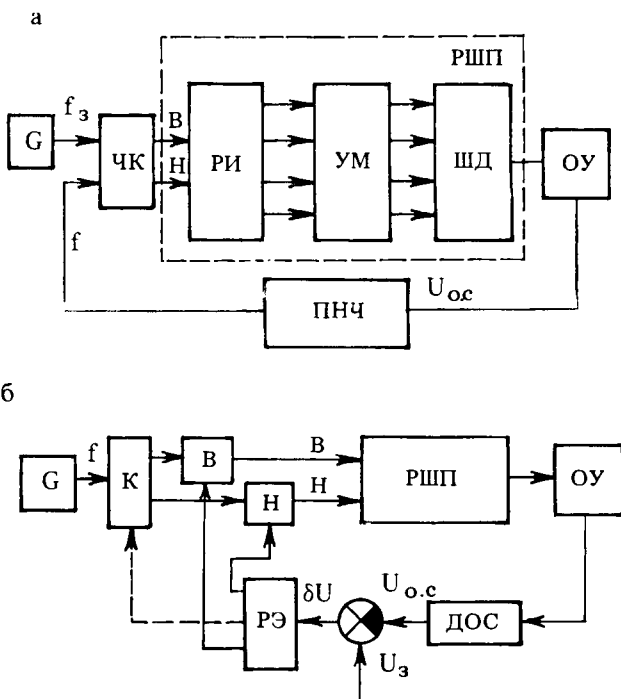


Рис. 6.13. Шаговый привод с пропорциональным (а) и релейным (б) регулированием.

вход В или Н РШП. При этом ключ К открывается или запирается независимо от наличия рассогласования. При трехпозиционном РЭ дополнительно используется состояние равенства $U_3 = U_{o.c.}$. При этом $\delta U = 0$, и ключ запирается.

6.7. СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Наиболее распространенной системой ЧПУ с ШД является система с разомкнутой структурой. Такая система применяется для обеспечения заданного перемещения при работе с частотой ниже частоты пристойности.

Например, на фрезерном станке модели 6Н13ГЭ (Горьковский завод фрезерных станков) применена СЧПУ с ШД для приводов подачи. Программа задается унитарным импульсным кодом, записанным на МЛ. Для каждой оси подачи выделено по две дорожки с записью движения "Вперед" и "Назад". Цена одного импульса программы соответствует одному шагу перемещения ротора ШД, которому в свою очередь соответствует перемещение РО, равное 0,026 мм. Вал шагового двигателя соединен с входным валом гидроусилителя момента, приводящего в движение ходовой винт станка.

При протягивании МЛ (рис. 6.14) с помощью лентопотяжного механизма в считывающих головках устройства ввода (УВВ) появляются импульсы

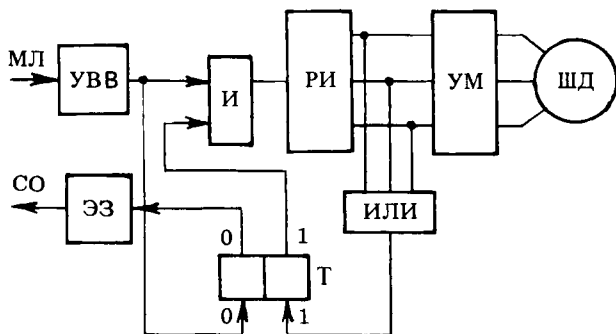


Рис. 6.14. Система программного управления ЭП с ШД.

ЭДС, поступающие на входы РИ, выбирающего при каждом новом импульсе очередной канал управления УМ. УМ подключен к ШД. В рассматриваемой системе предусмотрена защита от потери импульса (шага), которая реализуется с помощью триггера (Т), элемента И и элемента ИЛИ. Очередной импульс программы с УВВ может пройти на вход распределителя импульсов только при условии, если триггер находится в положении 1. Одновременно импульс программы поступает на нулевой вход триггера и перебрасывает его в состояние 0. Если РИ функционирует нормально, то в результате переключения каналов на схему ИЛИ поступит с вновь включенного канала импульсный сигнал, и триггер вновь придет в положение 1. Таким образом, будет обеспечена возможность поступления следующего импульса программы на вход РИ. Если же в работе РИ произойдет сбой и РИ не произведет переключения каналов, то сигнал на выходе элемента ИЛИ будет равным 0, триггер останется в положении 0, и подача импульсов программы на распределитель импульсов прекратится, ШД остановится. При этом с некоторой задержкой, реализуемой элементом задержки (ЭЗ), будет подан обслуживающему персоналу сигнал ошибки (СО).

РИ часто выполняются с потенциальными выходными сигналами. В таком случае на входе элемента ИЛИ необходимо включить устройство, преобразующее потенциальные сигналы в импульсные.

При обработке больших перемещений система ЧПУ должна, кроме величины перемещения, задавать максимальную скорость, которая может превосходить скорость, соответствующую приемистости ШД. В таком случае программа должна задать также закон изменения скорости при разгоне и торможении, обеспечивающий синхронность движения ротора и вектора напряжения ШД.

7. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ОБОРУДОВАНИИ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

7.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

7.1.1. Прямое и косвенное измерения перемещений

Важным элементом в устройствах с ЧПУ являются измерительные устройства — датчики, с помощью которых определяется действительное положение исполнительных органов (например, суппорта, поворотной стойки, плеча и др.). При этом происходит преобразование измеренного перемещения в электрический сигнал.

Датчики перемещений классифицируются по методу измерения перемещений (абсолютные или циклические), по способу представления измеряемой величины (аналоговые и цифровые), по способу сопряжения с исполнительным органом (прямые и косвенные), по типу конструктивного исполнения (линейные или круговые).

Датчики позволяют с высокими степенью точности и быстродействием осуществлять измерение перемещений исполнительных органов. Использование датчиков повышает производительность устройств с ЧПУ и улучшает качество выпускаемой продукции.

Под принципами измерения подразумеваются те физические закономерности, которые положены в основу действий датчика перемещения. Например, при движении диска с отверстиями или решетки между источником света и фотодиодом освещенность последнего изменяется, что влияет на выходное напряжение фотодиода. Этот принцип используется в фотоэлектрических датчиках перемещений.

Измерение перемещений может быть прямым и косвенным, аналоговым и цифровым.

При прямом измерении перемещений производится определение перемещения самого исполнительного органа, при косвенном измерении — какого-либо элемента, кинематически связанного с исполнительным органом. При прямом измерении положения, например суппорта (табл. 7.1), линейный датчик перемещения — измерительный преобразователь — непосредственно соединяется с исполнительным органом. Величина перемещения суппорта определяется непосредственно, путем сравнения положений измерительного преобразователя относительно измерительной линейки (базы линейных перемещений).

При косвенном измерении перемещения суппорта его положение определяется на основании измерения углового перемещения, совершаемого ходовым винтом (см. табл. 7.1). Датчик угла поворота ходового винта служит одновременно и датчиком перемещения суппорта. Благодаря соответствию угло-

Измерение перемещения	Привод и преобразователь	Причины ошибки измерения
Кинематически связаны: измерение линейного перемещения посредством измерения углового перемещения ходового винта		Температура; упругие деформации ходового винта (закручивание винта); износ ходового винта; люфт; погрешность измерительного преобразователя
Косвенное	Разделены: преобразование поступательного движения во вращательное с помощью прецизионной реечно-зубчатой пары	Температура; погрешность шага зубчатой рейки; несовпадение оси симметрии посадочного отверстия с осью венца; зазоры между элементами сборной рейки; ошибка, вносимая редуктором (мультипликатором); погрешность измерительного преобразователя
Прямое	Измерительный преобразователь осуществляет прямое измерение линейного перемещения суппорта	Температура; погрешность изготовления измерительной линейки; зазоры между элементами линейки

Примечания: Д — двигатель; ХВ, ИВ — ходовой и измерительный винт; ИП — измерительный преобразователь; С — суппорт, ИЛ — измерительная линейка; РЗП — реечно-зубчатая пара.

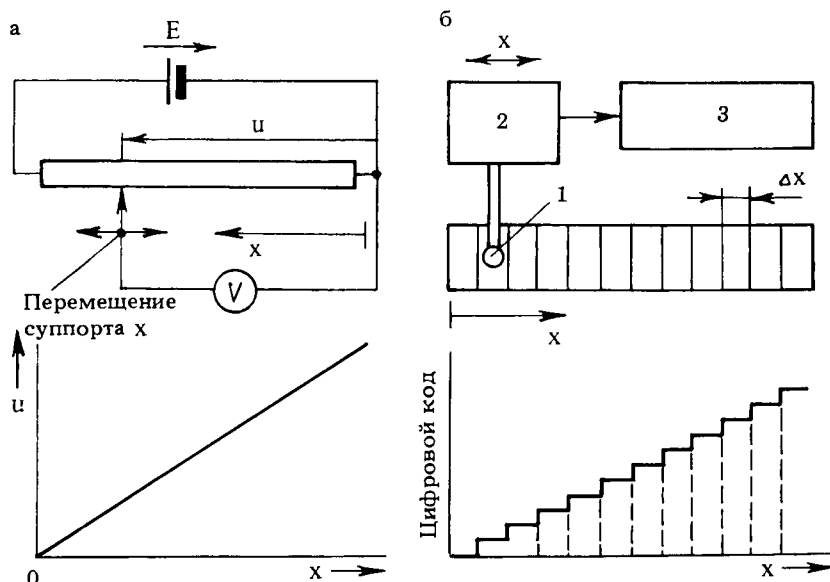


Рис. 7.1. Аналоговый (а) и цифровой (б) принципы измерения:
1 — фотоэлемент; 2 — суппорт; 3 — цифровой счетчик.

вого перемещения ходового винта и поступательного перемещения суппорта возможно косвенное измерение положения суппорта.

Косвенный метод измерения перемещения имеет место и в том случае, когда с помощью специального механизма связи, состоящего из прецизионной реечно-зубчатой пары и мультипликатора, поступательное движение преобразуется во вращательное. Причина использования описанного способа заключается в том, что измерительные линейки для контроля больших перемещений значительно дороже, чем датчики угловых перемещений.

Основные причины, вызывающие погрешность измерения при прямом и косвенном методе, приведены в табл. 7.1. Если при прямом методе на точность измерения влияет точность изготовления измерительной линейки, точность монтажа, а также ее реакция на изменение температуры, при косвенном методе точность зависит от дополнительных факторов (например, упругих деформаций и износа ходового винта).

7.1.2. Аналоговый и цифровой методы измерения

Аналоговый метод измерения характеризуется тем, что внутри области измерения каждому значению измеряемой величины соответствует единственное значение выходной величины датчика. Примером аналогового метода измерения перемещений может служить измерение перемещений с помощью потенциометра (рис. 7.1, а). В этом случае каждому положению ползунка потенциометра x (входная величина датчика) соответствует единственное значение напряжения u (выходная величина датчика). При цифровом методе измерения

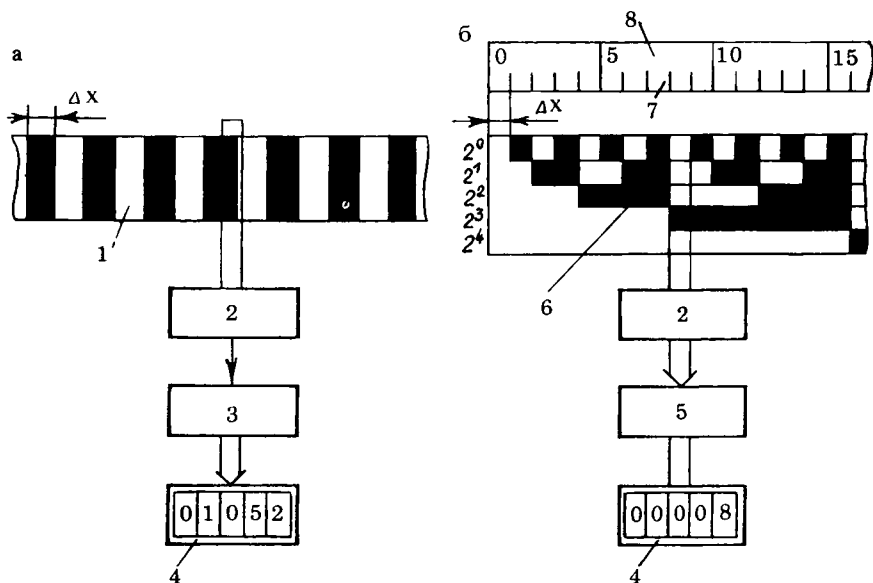


Рис. 7.2. Инкрементальный (а) и абсолютный (б) способы измерения перемещения: 1 — инкрементальная шкала линейки; 2 — чувствительные элементы; 3 — цифровой счетчик; 4 — цифровая индикация; 5 — дешифратор; 6 — шкала в цифровом коде; 7 — шкала в абсолютных единицах; 8 — измерительная линейка.

измеряемая величина делится на равновеликие участки (дискреты, инкременты, элементы перемещения) и выходная величина датчика соответствует определенной сумме этих участков. На рис. 7.1, б представлено разбиение измеряемого пути x на отдельные участки Δx . Выходная величина образуется суммированием отдельных участков. Значение выходной величины в виде цифрового кода поступает в канал обратной связи и на индикацию.

Важным признаком, связанным со способом формирования измеренной величины перемещения, является использование масштабов датчика перемещений. По этому признаку цифровые методы измерения и цифровые датчики делятся на относительные, или инкрементальные, и на абсолютные, или кодовые.

При относительном методе измерения перемещения повторяющийся импульсный сигнал после прохождения чувствительным элементом измеряемого участка поступает на вход счетчика, а от него — на индикацию и в канал обратной связи (рис. 7.2). Так как счет импульсов может быть начат с любой позиции, такой метод измерения называют относительным или циклическим, так как содержимое счетчика периодически, циклически становится равным нулю. При абсолютном способе измерения перемещений каждому положению рабочего органа в пределах его хода соответствует единственное значение цифрового кода. Например, каждому делению измерительной линейки соответствует единственный код, материальный носитель которого — кодовые дорожки.

Абсолютный метод измерения перемещений характеризуется рядом достоинств: а) каждое значение перемещения измеряется относительно жестко

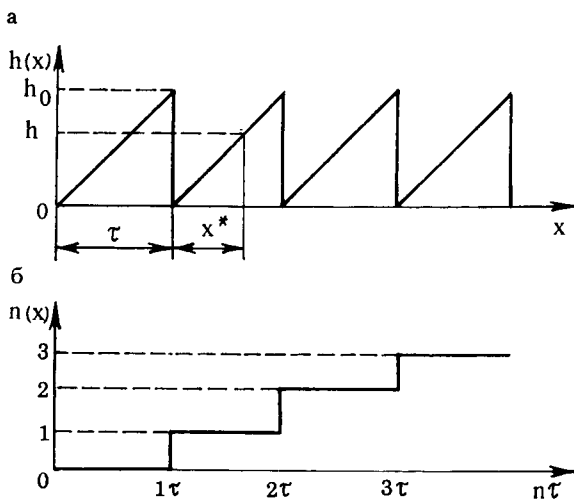


Рис. 7.3. Циклический способ измерения перемещения:
а – абсолютное измерение; б – относительное.

заданной нулевой отметки и может быть использовано без дополнительной обработки; не накапливается ошибка считывания, исключается появление относительной или циклической ошибки; б) истинное значение измеряемой величины сохраняется и при наличии помех, например при кратковременном исчезновении напряжения. Восстановление информации не требует при этом дополнительных затрат.

Однако этому способу присущи и недостатки: в том случае, когда требуется высокая точность измерения при большом ходе рабочего органа, затраты на изготовление требуемого числа кодовых дорожек очень сильно возрастают.

Аналоговый метод измерения является абсолютным. Разрешающая способность аналоговых датчиков невелика, поэтому очень часто применяют так называемый циклически-абсолютный способ измерения, представляющий собой комбинацию двух рассмотренных.

Внутри периодически повторяющегося интервала τ -цикла или периода измерения (рис. 7.3) перемещение x определяют с помощью абсолютного аналогового датчика. Дополнительно производится счет числа периодов n , входящих в x . Таким образом, текущее значение переменной $x = n(x)\tau + x^*$, где

$$x^* = \frac{h(x)}{h_0} \tau; n = 0, 1, 2, \dots; 0 \leq x^* \leq \tau; h - \text{аналоговая величина (напри-}$$

мер, напряжение), пропорциональная перемещению; h_0 – максимальное значение аналоговой величины; τ – период измерения.

7.2. АНАЛОГОВЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

7.2.1. Потенциометрические датчики

К аналоговым датчикам перемещений относятся прежде всего потенциометрические и индукционные электромагнитные преобразователи, которые применяются чаще всего для измерения линейных и угловых перемещений.

Измерение линейных и угловых перемещений с помощью потенциометрических датчиков основывается на линейной зависимости между активным сопротивлением потенциометра и угловым или линейным перемещением движка потенциометра.

Наиболее распространенными являются потенциометрические датчики, выполняемые на основе проволочных или пленочных потенциометров. На изолирующее основание такого датчика наносится спиралевидная обмотка или напыляется тонкий слой графита (металла). Разрешающая способность датчика в первом случае определяется расстоянием между двумя соседними витками обмотки.

Вследствие загрязнения активной поверхности потенциометра пылью, маслом увеличивается переходное сопротивление точки съема сигнала, что приводит к нарушению линейности характеристики датчика и к появлению ошибок измерения. По этой причине датчики должны быть хорошо защищены от внешних воздействий. Для точных измерений используются прецизионные потенциометры с очень малой нелинейностью характеристики. Так как разрешающая способность аналоговых преобразователей составляет 10^{-3} – 10^{-4} величины хода рабочего органа, с обычной степенью разрешения, равной 0,01 мм, могут быть измерены перемещения, не превышающие 100 мм. По этой причине потенциометрические датчики не нашли широкого применения в металло-режущих станках, так как здесь требуется контролировать большие перемещения. Однако в простых промышленных роботах, где точность позиционирования не высока и составляет примерно 1 мм, потенциометрические датчики используются широко.

7.2.2. Индукционные датчики перемещений

В основе действия индукционных (электромагнитных) датчиков перемещения лежит закон электромагнитной индукции. Если в магнитное поле, созданное проводником, по которому протекает переменный ток, внести второй проводник, то в нем будет индуцироваться напряжение, величина которого зависит от расстояния между проводниками и от их взаимного расположения. При изменении расстояния между проводниками на величину Δx действующее значение индуцированного напряжения изменится на величину Δu . Эта величина может служить мерой перемещения.

В индукционных датчиках чаще используются два переменных напряжения, подаваемые на две обмотки. Фазы напряжений сдвинуты на 90° . Выходной величиной является напряжение, индуцируемое в третьей обмотке.

По сравнению с потенциометрическими индукционные датчики имеют ряд преимуществ, а именно: у них отсутствует эффект квантования, присущий проволочным датчикам, кроме этого, благодаря отсутствию механического

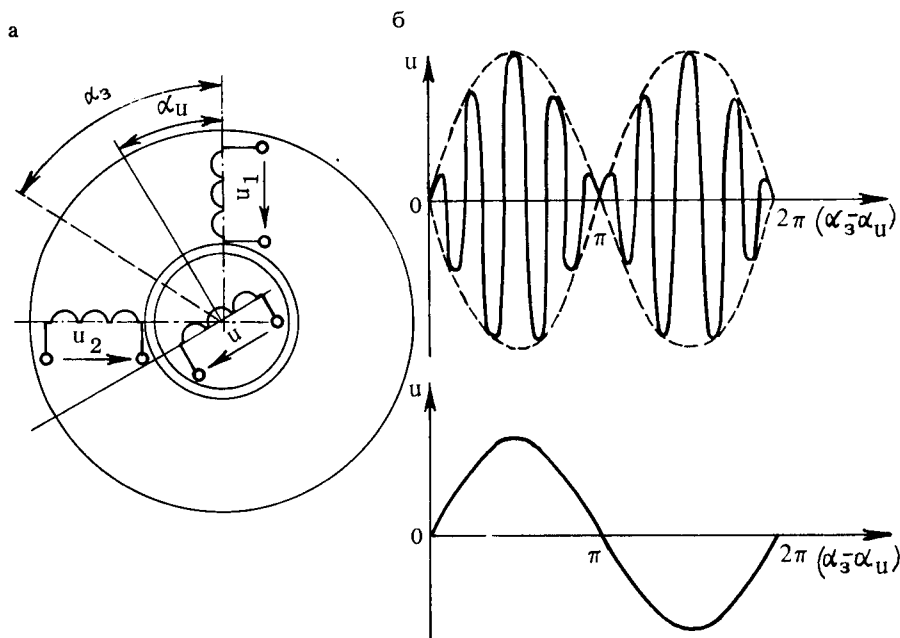


Рис. 7.4. Размещение обмоток (а) и диаграммы напряжений (б) вращающегося трансформатора.

контакта индукционные датчики допускают большее быстродействие и осуществляют гальваническое разделение входного и выходного сигналов.

Вращающийся трансформатор относится к электромагнитным измерительным устройствам. С его помощью осуществляется непосредственное измерение угловых перемещений или косвенное – линейных.

Вращающийся трансформатор представляет собой прецизионную электрическую микромашину, состоящую из статора и ротора. На статоре и роторе вращающегося трансформатора размещаются по две обмотки, оси которых сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 90° (рис. 7.4). Обмотки статора используют, как правило, в качестве первичных. Одна из обмоток ротора является измерительной, вторая обмотка замыкается на сопротивление, равное сопротивлению нагрузки измерительной обмотки.

Вращающийся трансформатор работает в амплитудном (трансформаторном) режиме или в фазовращательном. При работе в фазовращательном режиме на обмотки статора от источника подаются синусоидальные напряжения u_1 и u_2 , фазы которых сдвинуты друг относительно друга на 90° (электр.):

$$u_1 = U_{\max} \sin(\omega t + \alpha_3); u_2 = U_{\max} \cos(\omega t + \alpha_3),$$

где $U_{\max}$ – амплитуда напряжения; α_3 – заданное угловое положение ротора вращающегося трансформатора. При этом в воздушном зазоре возникает круговое вращающееся магнитное поле, в измерительной обмотке индуцируется ЭДС, и на выходе появляется напряжение u , фаза которого зависит от положе-

ния ротора и, следовательно, исполнительного органа, с которым связан ротор вращающегося трансформатора:

$$u = kU_{\max} \sin(\omega t + (\alpha_3 - \alpha_{\text{и}})),$$

где k — коэффициент связи; $\alpha_{\text{и}}$ — измеренное значение угла поворота ротора. Сравнивая фазу этого напряжения с фазой напряжения на статоре, задаваемой программно, по разности $\alpha_3 - \alpha_{\text{и}}$ можно определить величину углового расхождения.

При работе в амплитудном (индикаторном) режиме на обмотки статора подаются от управляемого по программе высокоточного источника входные напряжения u_1 и u_2 :

$$u_1 = U_{\max} \cos \alpha \sin \omega t; \quad u_2 = U_{\max} \sin \alpha \sin \omega t.$$

Частота входного напряжения 1–10 кГц. В воздушном зазоре создается пульсирующее электромагнитное поле, а в обмотке ротора индуцируется напряжение u :

$$u = kU_{\max} \sin(\alpha_3 - \alpha_{\text{и}}) \sin \omega t.$$

Амплитуда напряжения роторной обмотки пропорциональна разности между заданным угловым положением ротора и действительным. На рис. 7.4 представлены диаграмма напряжения измерительной обмотки ротора и диаграмма того же напряжения после выпрямления (с учетом фазы) и фильтрации.

Для измерения линейных перемещений используется индуктосин — измерительное устройство, состоящее из неподвижной линейки и бегуна. Линейка и бегун изготавливаются из немагнитного материала или керамики, с тем

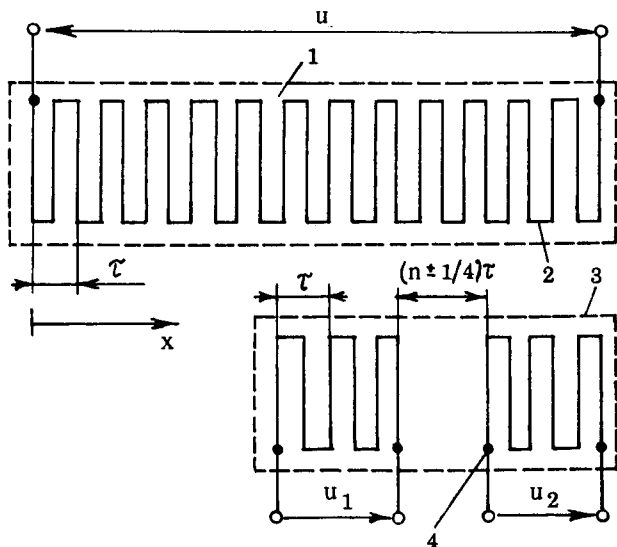


Рис. 7.5. Обмотки линейного индуктосина:

1 — линейка; 2 — обмотка линейки; 3 — бегун; 4 — обмотка бегуна.

чтобы генерируемое электромагнитное поле не претерпевало искажений. На их поверхность фотохимическим способом наносятся плоские обмотки. Схема расположения обмоток приведена на рис. 7.5. Шаг обмотки линейки и бегуна τ . На бегуне размещаются две обмотки, сдвинутые относительно друг друга на расстояние, равное $(n \pm 1/4)\pi$ шага обмотки, т.е. на $360^\circ \pm 90^\circ$. Измерение амплитуды или фазы напряжения обмоток позволяет с высокой степенью точности производить измерение линейных перемещений.

Для определения угловых перемещений используются круговые индуктосины. Круговой индуктосин состоит из плоского статора и плоского ротора. Линии обмоток статора и ротора располагаются радиально. По принципу действия, режиму работы такой индуктосин аналогичен развернутому вращающемуся трансформатору.

При работе в амплитудном режиме на обмотку индуктосина, расположенную на линейке, подается синусоидальное напряжение с частотой несколько килогерц (например, 10 кГц): $u = U_{\max} \sin \omega t$. Это напряжение вызывает по-

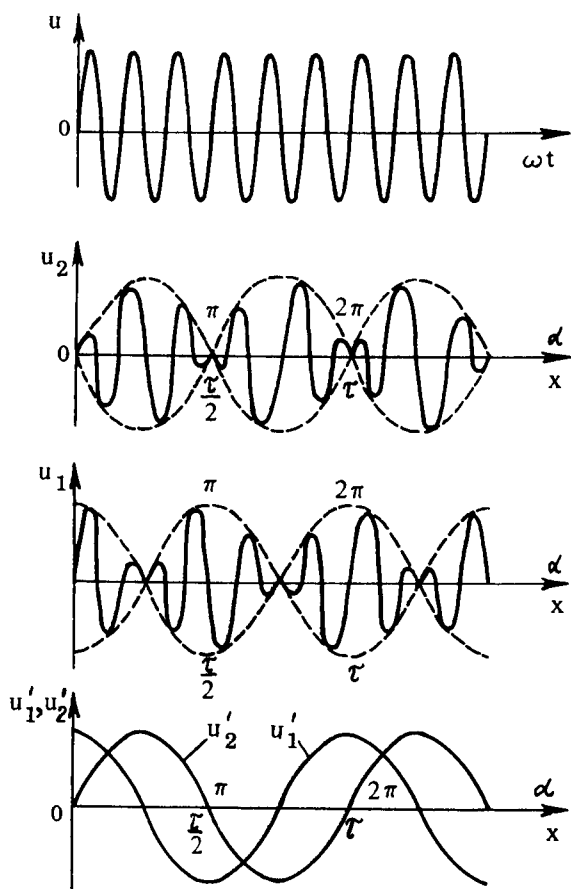


Рис. 7.6. Диаграммы напряжений обмоток индуктосина, работающего в амплитудном режиме.

явление магнитного поля, которое в свою очередь индуцирует в обмотках бегуна переменные напряжения u_1 и u_2 . Вследствие пространственного смещения обмоток на $1/4$ шага амплитуды напряжений u_1 и u_2 (рис. 7.6) пропорциональны соответственно косинусу и синусу угла α :

$$u_1 = kU_{\max} \cos \alpha \sin \omega t; \quad u_2 = kU_{\max} \sin \alpha \sin \omega t,$$

где $\alpha = \frac{2\pi}{\tau} x$, τ — шаг обмотки.

При перемещении бегуна вдоль линейки фаза высокочастотных сигналов периодически изменяется на 180° . Фаза напряжений u_1 и u_2 изменяется в точках прохождения огибающих через нуль. Однозначное определение положения бегуна индуктосина осуществляется путем вычисления фазы α огибающих напряжений обмоток бегуна U'_1 и U'_2 (см. рис. 7.6), а также соотношения фаз высокочастотных сигналов — синфазности или противофазности. В индуктосине используется циклично-абсолютный метод измерения, так как абсолютное измерение перемещений происходит только внутри периода — шага обмотки τ , после перехода на новый шаг измеренные значения циклически повторяются.

Для измерения линейных перемещений исполнительного органа линейка индуктосина крепится на неподвижной части машины (станка), бегун — на подвижной части. Зазор между линейкой и бегуном составляет приблизительно 0,25 мм. Линейки индуктосина изготавливаются с шагом обмотки, равном 2 мм, и длиной от 250 до 1000 мм. Если величина контролируемых перемещений превышает длину индуктосина, линейка собирается из нескольких секций, что требует тщательной юстировки. Разрешающая способность индуктосина и вращающегося трансформатора составляет 10^{-3} – 10^{-4} . Для измерения больших перемещений с повышенной точностью, например 10 м с точностью 0,01 мм, применяют многоступенчатые системы, содержащие датчики, связанные друг с другом с помощью высокоточных механических редукторов.

7.3. ЦИФРОВЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Для измерения угловых и линейных перемещений в металлорежущих станках, промышленных роботах используют цифровые измерительные устройства. Характерным признаком этих устройств является квантование измеряемых величин: линейные или угловые перемещения разбиваются на ряд равновеликих элементарных линейных или угловых перемещений (Δx или $\Delta \alpha$) (рис. 7.7).

В зависимости от того, как формируется информация на выходе цифрового датчика (путем суммирования элементарных перемещений либо путем считывания кода, соответствующего мгновенному значению перемещения, со шкалы), различают инкрементальные (импульсные) датчики и кодовые.

Инкрементальные (импульсные) датчики относятся к группе относительных датчиков, кодовые — к группе абсолютных.

Для квантования линейных и угловых перемещений могут применяться различные физические эффекты. Так, измерительная линейка может быть

Рис. 7.7. Фрагмент диска с нанесенными элементами (инкрементами) углового перемещения.

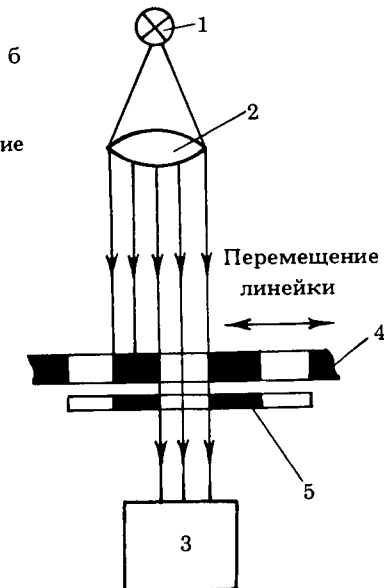
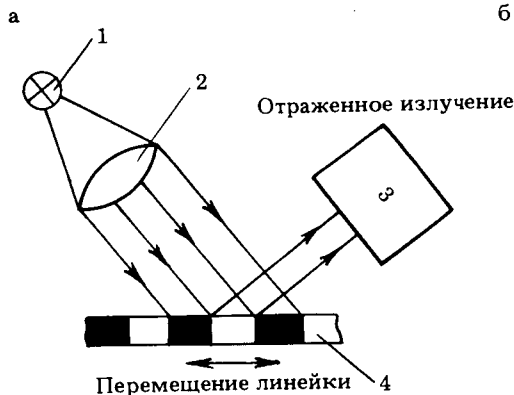
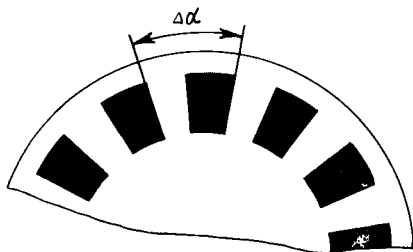


Рис. 7.8. Принципы получения информации от фотоэлектрического датчика:
 1 – источник излучения; 2 – оптическая система; 3 – фотоприемник; 4 – линейка;
 5 – формирующая решетка.

разделена на участки, проводящие и не проводящие электрический ток, или на магнитные и немагнитные. В настоящее время наибольшее распространение получили фотоэлектрические цифровые датчики (из-за высокой разрешающей способности).

Основными элементами фотоэлектрического датчика являются: линейка или диск с нанесенными на их поверхность чередующимися темными и светлыми участками и приемное устройство (рис. 7.8). Положение линейки или диска определяется путем контролирования отраженного излучения либо излучения, прошедшего через линейку (диск).

Приемное устройство состоит из источника света, оптической системы и светоприемника (фотоэлемента). При движении приемника относительно линейки или диска яркость светового потока, падающего на фотоэлементы, меняется. С помощью фотоэлементов, схемы формирования и логической

схемы яркость преобразуется в электрический сигнал, используемый для определения величины и направления перемещения.

7.3.1. Импульсные датчики

На рис. 7.9 представлено устройство импульсного датчика для измерения линейных перемещений. Измерение осуществляется с помощью светового потока, отраженного поверхностью прецизионной стеклянной линейки. Поток проходит сквозь формирующую решетку и поступает на фотоэлементы. Активная поверхность фотоэлемента захватывает одновременно несколько элементарных участков линейки. Формирующая решетка определяет ширину элементарного участка, излучение которого направляется на фотоэлемент. При движении фотоэлементов и решетки относительно линейки на выходе фотоэлементов генерируются синусоидальные сигналы, превращаемые схемой формирования в сигналы прямоугольной формы.

Деление масштабной линейки (диска) на элементарные участки осуществляется с очень высокой степенью точности. Границы темных и светлых участков должны быть очень резкими. Темные участки формируются путем напыления в вакууме на прозрачную основу тонкого слоя металла или путем

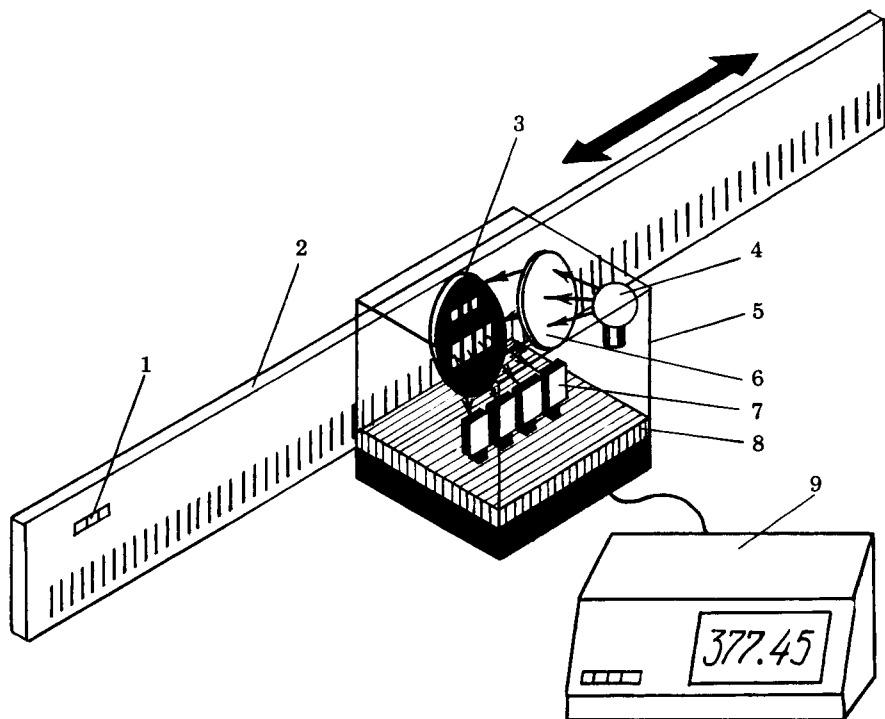


Рис. 7.9. Фотоэлектрический датчик для измерения линейных перемещений:
1 — начальная метка; 2 — металлическая линейка с нанесенной решеткой; 3 — формирующая решетка; 4 — лампа; 5 — корпус; 6 — оптическая система; 7 — фотоэлементы; 8 — электронный блок; 9 — блок индикации.

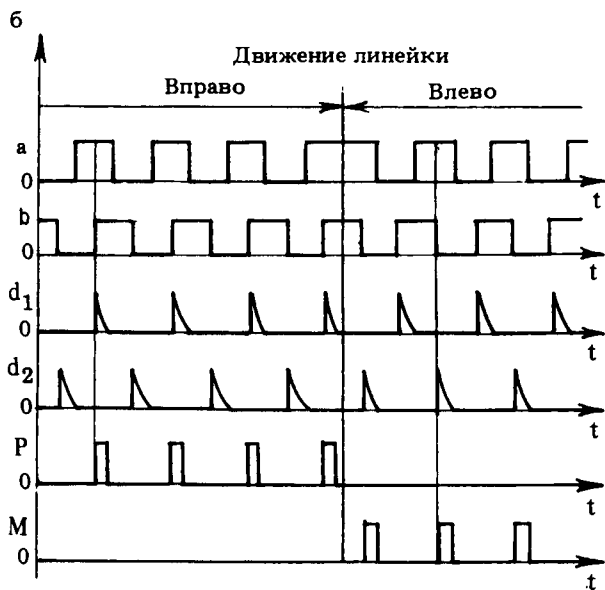
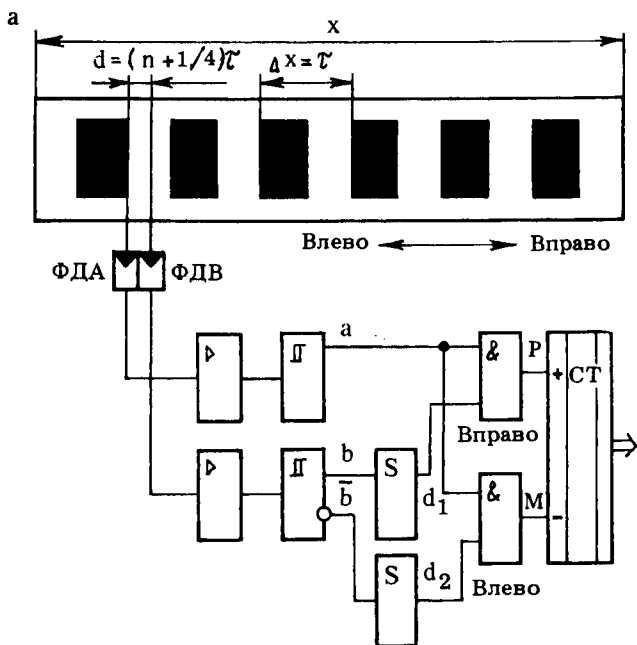


Рис. 7.10. Схема распознавания направлений движения (а) и временные диаграммы сигналов (б).

нарезки на стеклянной или металлической поверхности. Разрешающая способность импульсного датчика определяется числом элементарных участков (линий), на которое может быть разбита масштабная линейка или диск датчика.

Принцип распознавания направления движения в импульсных (инкрементальных) датчиках может быть объяснен с помощью схемы и диаграмм, изображенных на рис. 7.10. На рис. 7.10, *а* представлена часть линейки с темными и светлыми участками (штрихи). Обозначим ширину штриха $\tau/2$, где τ — шаг датчика (элементарное перемещение). Приемное устройство датчика, кроме оптической системы и фотоэлементов, содержит две формирующие решетки, изготовленные также с шагом τ . Решетки с соответствующими фотоэлементами смещены в пространстве относительно друг друга на $1/4\tau$. На рис. 7.10, *а* это обстоятельство учтено с помощью соответствующего размещения фотодиодов. В действительности же по причине малости расстояния, равного $1/4\tau$, приемные элементы размещаются относительно друг друга на большем расстоянии. Это расстояние $a = (n + 1/4)\tau$, где n — целое число.

При движении фотоэлементов или линейки на выходе фотоэлементов генерируются два синусоидальных сигнала. Эти сигналы усиливаются и с помощью триггеров Шмита превращаются в прямоугольные сигналы a и b (рис. 7.10, *б*). Сигналы имеют фазовый сдвиг, равный 90° . Сигнал b инвертируется, оба сигнала b и $\bar{b}$ дифференцируются и преобразуются в сигналы d_1 и d_2 . В зависимости от того, в каком направлении относительно фотоэлементов движется линейка (влево или вправо), будет изменяться положение сигналов d_1 и d_2 относительно сигнала a и направление счета реверсивного счетчика. Счетчик может быть установлен в состояние 0 при любом положении датчика. Поэтому импульсные датчики служат для измерения угловых и линейных перемещений относительно заданной точки начала отсчета. В фотоэлектрических импульсных датчиках достигается разрешение, равное 10 000 импульсов на один оборот, или 250 импульсам на 1 мм. Несмотря на относительную простоту, импульсные датчики обладают существенными недостатками: они подвержены влиянию помех; ошибка, появившаяся в ходе счета, сохраняется до тех пор, пока счетчик не будет снова установлен в положение 0.

7.3.2. Кодовые датчики

Кодовые датчики, как и импульсные, имеют линейки или диски. Их поверхность разделена не только на участки элементарных перемещений Δx или Δa (см. рис. 7.11), но и на кодовые дорожки. Каждому элементарному перемещению соответствует определенный код (слово). В кодовых датчиках в отличие от импульсных положение каждого элемента Δx или Δa однозначно определено кодом относительно начала отсчета, что обеспечивает абсолютное измерение линейного или углового перемещения. На рис. 7.11 схематически представлены кодовая линейка и кодовый диск с нанесенными кодовыми дорожками.

Существуют различные способы кодирования элементов пути, например с помощью двоичного или двоично-десятичного кода. Если светлым участкам кодовых дорожек присвоить значение двоичного нуля, а темным участкам — двоичной единицы, то при одновременном опросе кодовых дорожек, напри-

Так, для измерения участка длиной 1 м с точностью 0,01 мм требуется 17 кодовых дорожек:

$$n = \left(\lg \frac{1}{0,01 \cdot 10^{-3}} \right) \frac{1}{\lg 2} = 17.$$

При считывании данных с кодовой линейки или кодового диска могут появиться ошибки, связанные с одновременным переходом с темных участков на светлые (или наоборот) и с конечными размерами фоточувствительных элементов, которые эти переходы фиксируют. В силу конечного размера фотодатчиков и неточного размещения их вдоль оси считывания переход может быть, например, неодновременно зафиксирован на всех трех дорожках, и вместо ожидаемого кода 1000 (см. рис. 7.11) в момент съема сигналов могут быть получены коды:

$$\begin{aligned} 1001 &= 9, & 1101 &= 13, \\ 1010 &= 10, & 1110 &= 14, \\ 1011 &= 11, & 1111 &= 15, \\ 1100 &= 12, \end{aligned}$$

Для предотвращения появления описанных ошибок применяют иной метод считывания (так называемый "V-метод") либо другой способ кодирования.

При V-считывании на кодовой дорожке младшего разряда устанавливается один чувствительный элемент, в остальных — по два, со сдвигом, равным половине шага младшей кодовой дорожки, влево и вправо относительно предыдущего младшего разряда (рис. 7.11). При считывании коды формируются с помощью логической схемы по следующему алгоритму:

- 1) если $b_{k-1} = 0$, то опрос фотоэлемента в старшем разряде справа b_{kp} ;
- 2) если $b_{k-1} = 1$, то опрос фотоэлемента в старшем разряде слева b_{kl} ;
- 3) сигнал k -й кодовой дорожки b_k определяется в соответствии с логическим выражением:

$$b_k = (b_{k-1}) \wedge (b_{kl}) \vee (\overline{b_{k-1}}) \wedge (b_{kp}),$$

где b — двоичный сигнал, поступающий с фотоэлемента.

Логическая схема, удовлетворяющая описанному алгоритму, приведена на рис. 7.11. В данном примере при нахождении фотоэлементов на линии А могут быть считаны только два кода: 0111 или 1000. Ошибка считывания составляет единицу младшего разряда. Это характерно для V-метода, недостатком которого является большее число фотоэлементов, что увеличивает стоимость датчика.

Применение циклических кодов, например кода Грея, приводит к тому, что при переходе от одного элементарного участка к другому изменение двоичной цифры происходит только в одном разряде, на одной кодовой дорожке. В датчиках с циклическим кодом ошибка считывания не превышает единицы младшего разряда независимо от того, в каком разряде произошло неверное считывание информации. Недостатком датчиков с циклическим кодом является необходимость преобразования этого кода в двоичный, применяемый в системах с числовым программным управлением.

Для увеличения разрешающей способности, например при измерении угловых перемещений, несколько кодовых датчиков размещаются в одном корпусе и соединяются друг с другом с помощью прецизионных редукторов.

7.3.3. Датчики перемещений на основе интерферометров

Датчики перемещений на основе интерферометров являются по существу импульсными или инкрементальными датчиками, в которых величина элементарного перемещения равна половине длины волны монохроматического излучения (чаще всего лазерного). Такие датчики характеризуются высокой точностью и очень высокой разрешающей способностью. Основным элементом датчиков является лазерный интерферометр.

Принцип действия лазерного интерферометра показан на рис. 7.12. Источник лазерного излучения испускает монохроматический когерентный свет. Часть этого излучения (опорный луч), преломленная полупрозрачным зеркалом $z1$ и отраженная зеркалом $z2$, поступает на фотоприемник. Другая часть (измерительный луч) попадает на рефлектор $z3$, укрепленный на объекте (исполнительном органе), перемещение которого контролируется. Затем луч отражается и с помощью зеркала $z1$ направляется на фотоприемник. Здесь про-

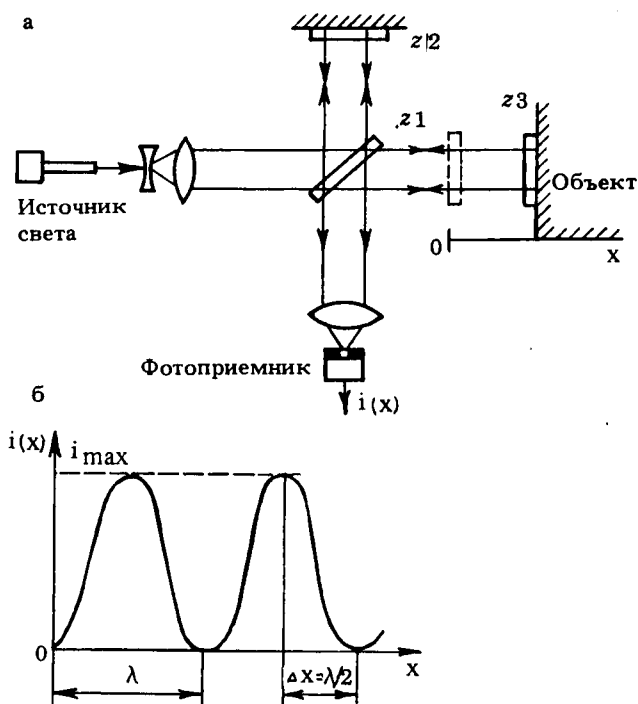


Рис. 7.12. Принцип действия интерферометра:

а — схема интерферометра; б — зависимость выходного сигнала фотоприемника i от перемещения x .

исходит наложение опорного и измерительного лучей. Интенсивность суммарного излучения на поверхности фотоприемника определяет величину напряжения на его выходе. Если рефлектор $z3$ изменяет свое положение относительно зеркала $z1$, то появляется фазовое рассогласование между опорным и измерительными лучами. Это приводит к изменению падающего на фотоприемник излучения. В зависимости от совершенного рефлектором (исполнительным органом) перемещения x интенсивность излучения изменяется по закону

$$i = i_{\max} \cos^2 \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right),$$

где x — перемещение; λ — длина волны светового излучения; $i_{\max}$ — максимальная интенсивность излучения.

При смещении зеркала $z3$ интенсивность излучения i на поверхности фотоприемника изменяется по гармоническому закону с периодом, равным половине длины волны светового излучения. Измеряемое перемещение, совершенное объектом, определяется путем суммирования максимумов или минимумов интенсивности излучения и равно целому числу элементарных перемещений $\lambda/2$.

Точность измерений, основанных на эффекте интерференции лазерного излучения, в большой степени зависит от стабильности длины световой волны. Длина волны определяется внешними условиями, давлением воздуха, температурой и влажностью воздуха, содержанием в воздухе углекислого газа, а также рабочим состоянием самого лазера (например, периодом вхождения лазера в рабочий режим).

Повышение стабильности длины волны может быть достигнуто различными способами, например путем применения двухчастотного лазера. При этом возможно автоматическое регулирование частоты излучения, что практически исключает период вхождения лазера в рабочий режим. Кроме того, двухчастотный лазерный интерферометр позволяет наиболее простым способом осуществить распознавание направления движения объекта, что является необходимым условием для функционирования позиционных и следящих систем.

Лазерная трубка, расположенная вдоль силовых линий магнитного поля, излучает монохроматический когерентный свет (рис. 7.13). Это излучение содержит две высокостабильных составляющих с очень близкими частотами f_1 и f_2 , равными приблизительно $0,47408343 \cdot 10^{15}$ Гц ($f_2 - f_1 = 1,8 \cdot 10^6$ Гц). Часть излучения отражается и направляется на фотоприемник A . В зависимости от фаз обеих составляющих излучения на поверхности фотоприемника происходит соответствующее изменение интенсивности, на выходе фотоприемника появляется гармонический сигнал со стабильной частотой, равной $f_2 - f_1$. Другая часть светового излучения попадает в интерферометр и расщепляется на основной луч с частотой f_2 и измерительный луч с частотой f_1 . Измерительный луч направляется на рефлектор (триплекс), закрепленный на объекте, перемещение которого контролируется, и отражается. Луч, отраженный подвижным рефлектором, и луч, отраженный неподвижным рефлектором, попадают на фотоприемник B . На выходе фотоприемника появляется сигнал. При движении объекта и, следовательно, рефлектора возникает эффект Доплера. В

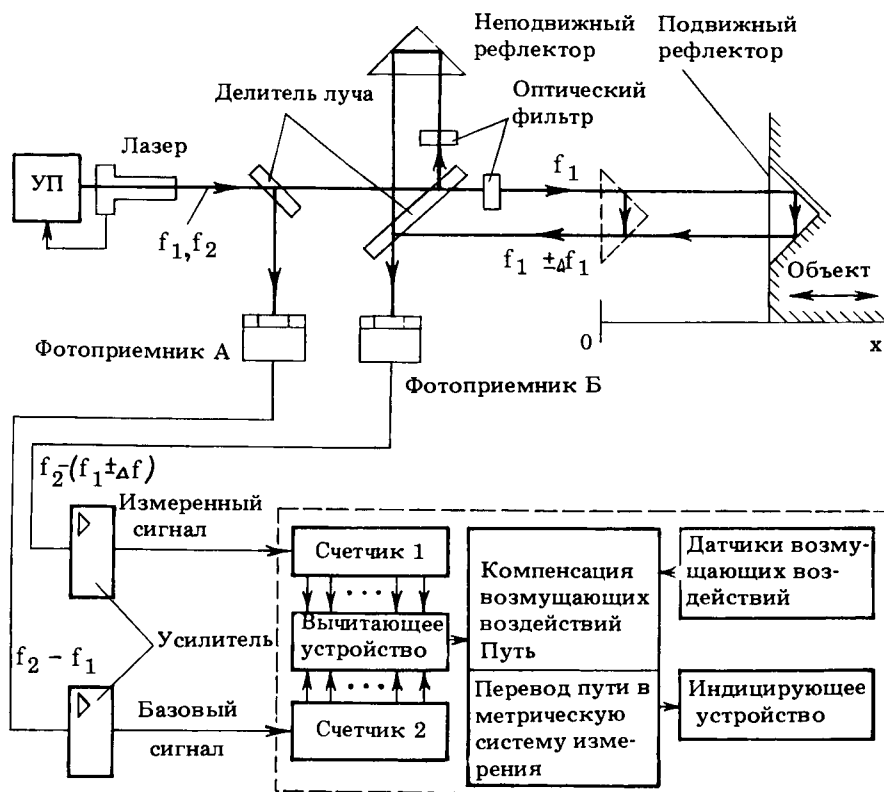


Рис. 7.13. Принцип действия двухчастотного лазерного интерферометра.

результате происходит смещение частоты измерительного луча и сигнала фотоприемника на величину Δf . Значение Δf пропорционально скорости движения объекта. В вычислительном устройстве интерферометра на основании сигналов, поступающих от фотоприемников А и Б, определяется величина перемещения, совершенного объектом. Перемещение измеряется в единицах, кратных четверти длины волны, а затем индицируется в метрической системе измерения.

Изменение внешних условий (температуры и влажности воздуха, температуры конструкции) непрерывно контролируется чувствительными датчиками и учитывается при вычислении пройденного пути.

С помощью лазерного интерферометра в настоящее время достигается погрешность измерения, равная приблизительно одному микрону на каждый метр измеряемой длины. За счет удвоения частоты может быть получено разрешение, равное $5 \cdot 10^{-3}$ мк. С помощью таких измерительных средств могут быть соблюдены самые жесткие требования, предъявляемые к точности систем с числовым программным управлением.

На рис. 7.14 приведена схема лазерной измерительной системы, предназначенной для применения в металлорежущих станках, измерительных систе-

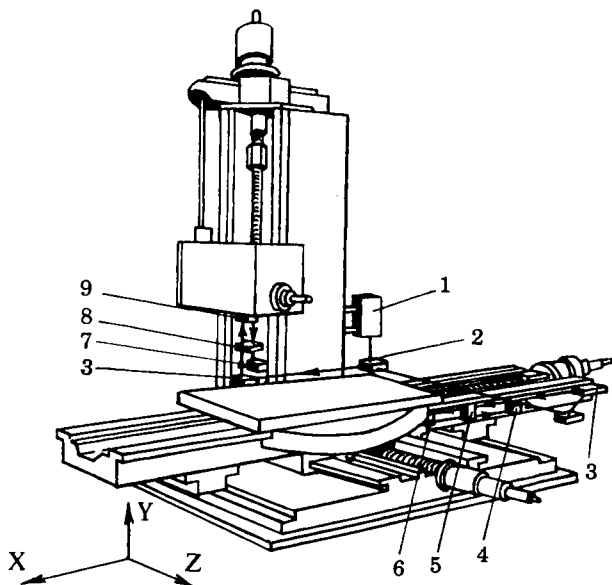


Рис. 7.14. Измерение трех координат металлорежущего станка с помощью лазерной измерительной системы:

1 — лазер; 2 — делитель луча; 3 — отклоняющее зеркало; 4 — фотоприемник X ; 5 — интерферометр X ; 6 — рефлектор X ; 7 — фотоприемник Y ; 8 — интерферометр Y ; 9 — рефлектор Y .

мах, промышленных роботах. Главными признаками такой системы являются: малые габариты оптических элементов, разнесение лазера и приемных устройств. С помощью одного источника излучения в этой системе возможно одновременное измерение перемещений по шести координатам. Расщепляя световой поток и используя отклоняющие зеркала, лучи можно направлять по соответствующим осям. В простейшем исполнении такая система обладает разрешающей способностью, равной 0,16 мкм. Система применяется также для калибровки и контроля обрабатывающего и измерительного инструмента. За счет различного расположения элементов системы возможно измерение длины, угла, прямолинейности, плоскостности и перпендикулярности.

8. КОНТУРНЫЕ И ПОЗИЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

8.1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Управление технологическим процессом в различных областях техники осуществляется путем реализации соответствующего алгоритма, использующего необходимую априорную, исходную и текущую информацию. *Априорная информация* содержит сведения о законах и соотношениях, вытекающих из физической природы процесса и применяемого оборудования. *Исходная информация* включает конкретные задания и ограничения. Наконец, *текущая информация* отражает состояние процесса и его элементов в данный момент времени.

Способ управления процессом в значительной степени зависит от используемых технических средств, степени детерминированности процесса, а также от его непрерывности или дискретности. В частности, при обработке изделий на металлорежущих станках технологический процесс является дискретным. Для таких процессов большое значение имеет повторяемость процесса, связанная с серийностью производства изделий.

Программное управление реализует алгоритм управления в виде программы, в которой дается последовательность операции и порядок изменения координат процесса.

Существующие СПУ делятся на аналоговые, цикловые и числовые. Наиболее эффективными по точности, производительности и простоте настройки являются системы ЧПУ, которые в зависимости от используемых технических средств могут быть разделены на обычные системы ЧПУ с постоянной структурой (NC, HNC) и системы с переменной структурой, использующие микроЭВМ или микропроцессоры (CNC, SNC, DNC). По взаимной связи между координатами различают позиционные, контурные и контурно-позиционные системы ЧПУ.

Позиционные (или координатные) системы ЧПУ обеспечивают перемещение рабочего органа из одной заданной точки в другую. Для этих систем наиболее существенным является обеспечение точности попадания РО в заданную точку. При наличии нескольких степеней подвижности взаимная связь координат и, следовательно, траектория движения РО не имеет существенного значения. Позиционные системы в большинстве случаев должны обладать высоким быстродействием. Программа, управляющая позиционной системой, кроме величины перемещения, может задавать тахограмму движения, обеспечивающую требуемое быстродействие.

Позиционные системы ЧПУ применяются в сверлильно-расточных, координатно-расточных, расточных станках главным образом для выполнения установочных перемещений.

Контурные (или непрерывные) системы ЧПУ используются в основном для управления рабочими органами с несколькими степенями подвижности, когда

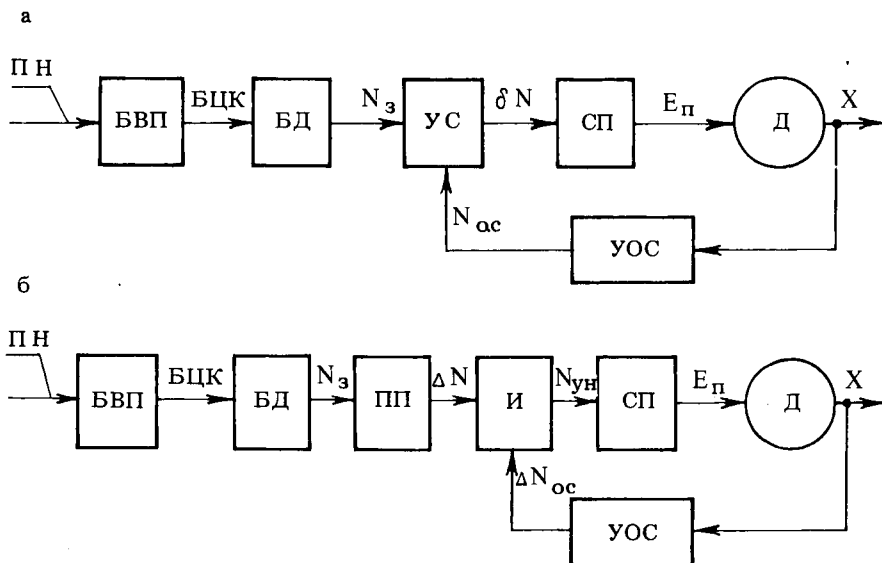


Рис. 8.1. Упрощенная структура управления ЭП позиционной (а) и контурной (б) систем.

изменение координат должно быть взаимосвязанным и движение рабочего органа происходит по заданной траектории. Такие системы применяются на металлорежущих станках для обработки сложных поверхностей и контуров.

Разновидность контурных систем ЧПУ – контурные прямоугольные системы, например для обработки прямоугольных циклов на фрезерных станках. В этих системах программируются конечные координаты перемещения и скорости движения на отдельных участках движения, обеспечивающие необходимые показатели технологического процесса.

Контурно-позиционные системы ЧПУ являются комбинированными и позволяют осуществлять как позиционные, так и контурное управление.

Структуры управления ЭП в позиционной и контурной системах ЧПУ упрощенно показаны на рис. 8.1, а, б.

Программа, записанная на программонителе (ПН), поступает в блок ввода программы (БВП). В качестве ПН используется перфолента или перфокарты. Считывание с ПН производится по кадрам в буквенно-цифровом коде (БЦК). Полученный БЦК поступает в блок декодирования (БД), в котором расшифровываются получаемые команды и выделяется цифровой код задания движения N_3 по данной координате. В позиционной системе код N_3

представляет собой заданное перемещение РО. В устройстве сравнения (УС) код задания сравнивается с кодом обратной связи N_{oc} . Получаемая разность $\delta N = N_3 - N_{oc}$ поступает на вход силового преобразователя (СП), ЭДС которого E_n изменяется в соответствии с изменением δN . Двигатель (Д) перемещает РО так, что выходная координата X изменяется в требуемом направ-

лении. Изменение координаты X преобразуется устройством обратной связи (УОС) в код обратной связи $N_{o.c.}$.

В частном случае устройство сравнения может быть выполнено в виде регистра или регистра и реверсивного счетчика, в который первоначально вносятся требуемое число шагов перемещения X . При этом обратная связь осуществляется унитарным кодом $N_{o.c.}$, число импульсов которого равно числу фактически произведенных шагов перемещения.

Структура системы контурного управления (см. рис. 8.1, б) отличается от рассмотренной наличием промежуточной памяти (ПП), в которой запоминаются перемещение, заданное в предыдущем кадре, и приращение ΔN перемещения, задаваемого при расшифровке очередного кадра. ПП сохраняет и другие признаки кода, определяющие требуемый закон движения в пределах отработки текущего кадра программы.

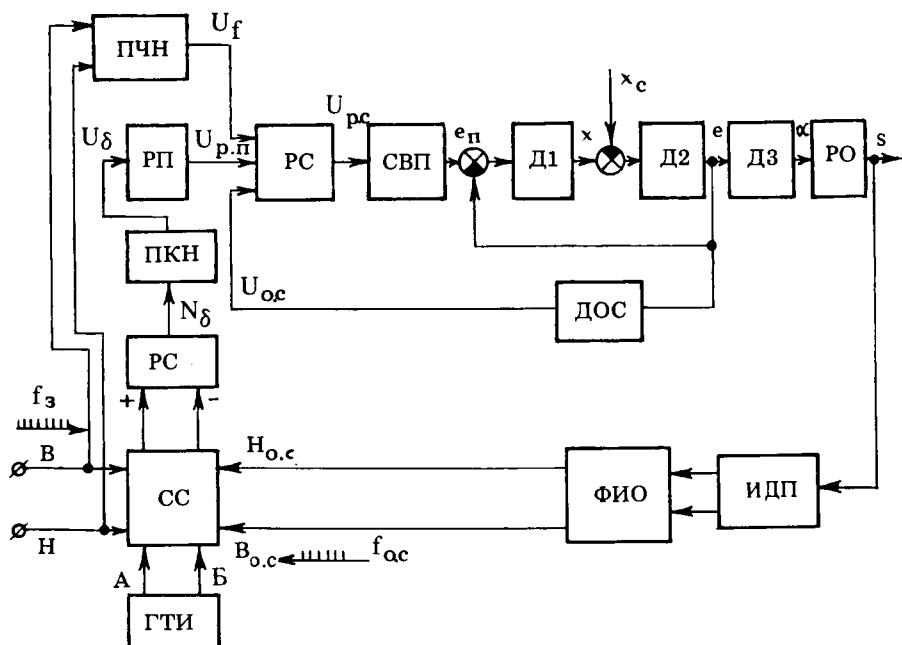
Информация, хранящаяся в ПП, поступает на интерполятор (И), преобразующий цифровой код ΔN в унитарный $N_{ун}$, число импульсов которого определяет величину перемещения, а их частота — скорость рабочего органа. В момент окончания отработки перемещения, заданного в текущем кадре, $\Delta N - \Delta N_{o.c} = 0$, и система переходит к отработке следующего кадра программы.

8.2. СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМ ДАТЧИКОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ "КОД-НАПРЯЖЕНИЕ"

Функциональная схема системы показана на рис. 8.2. Перемещение s рабочего органа (РО) задается в виде последовательности импульсов, поступающих от интерполятора с частотой f_z . Фактическое перемещение РО фиксируется реверсивным импульсным датчиком перемещения (ИДП), имеющим два чувствительных элемента, последовательность работы которых зависит от направления движения РО. Сигналы, получаемые от ИДП, преобразуются в формирователе импульсов отработки (ФИО) в последовательность импульсов обратной связи. При заданном направлении движения (например, "Вперед") импульсы программы по входу В подаются на схему синхронизации (СС). При этом импульсы обратной связи поступают на схему синхронизации через вход ($B_{o.c.}$). После прохождения СС импульсы задания поступают на вход сложения (+) реверсивного двоичного счетчика РСч, а импульсы обратной связи — на вход вычитания (−). В результате в реверсивном счетчике (РСч) образуется код рассогласования N_δ , выражающий разность поступивших в счетчик чисел импульсов задания и отработки. Аналогично образуется код рассогласования при задании движения "Назад" (Н). В этом случае импульсы задания проходят по входу Н через СС на вход (−) реверсивного счетчика, а импульсы обратной связи через $H_{o.c}$ и СС на вход (+) РСч.

Схема синхронизации СС (рис. 8.3) состоит из блоков синхронизации БС1–БС4, управляемых двумя последовательностями тактовых импульсов А и Б, получаемых от генератора тактовых импульсов (ГТИ). При движении "Вперед" импульсы задания (ИЗ) от интерполятора проходят к реверсивному счетчику через блок БС1, а импульсы отработки от ФИО — через блок БС4.

а



б

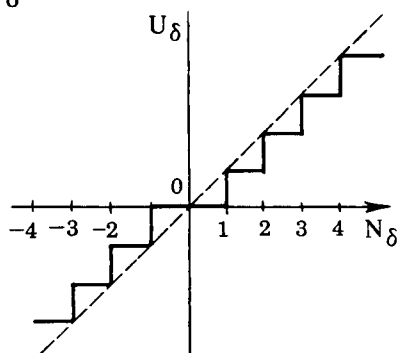


Рис. 8.2. Функциональная схема системы ЧПУ с импульсным датчиком перемещения (ИДП) и преобразователем "Код-напряжение" (ПРН) (а) и характеристика ПРН (б).

На рис. 8.3, б показана схема блока БС1. Схема блока БС4 полностью аналогична ей, но в ней должны быть приняты обозначения, указанные в скобках. Если на рис. 8.3, б входы В ($B_{o.c}$) заменить на входы "Назад", то получим схемы блоков БС2, БС3.

На рис. 8.3, в даны временные диаграммы для блоков БС1, БС4. При одновременном появлении ИЗ на входе В и импульса отработки (ИО) на входе

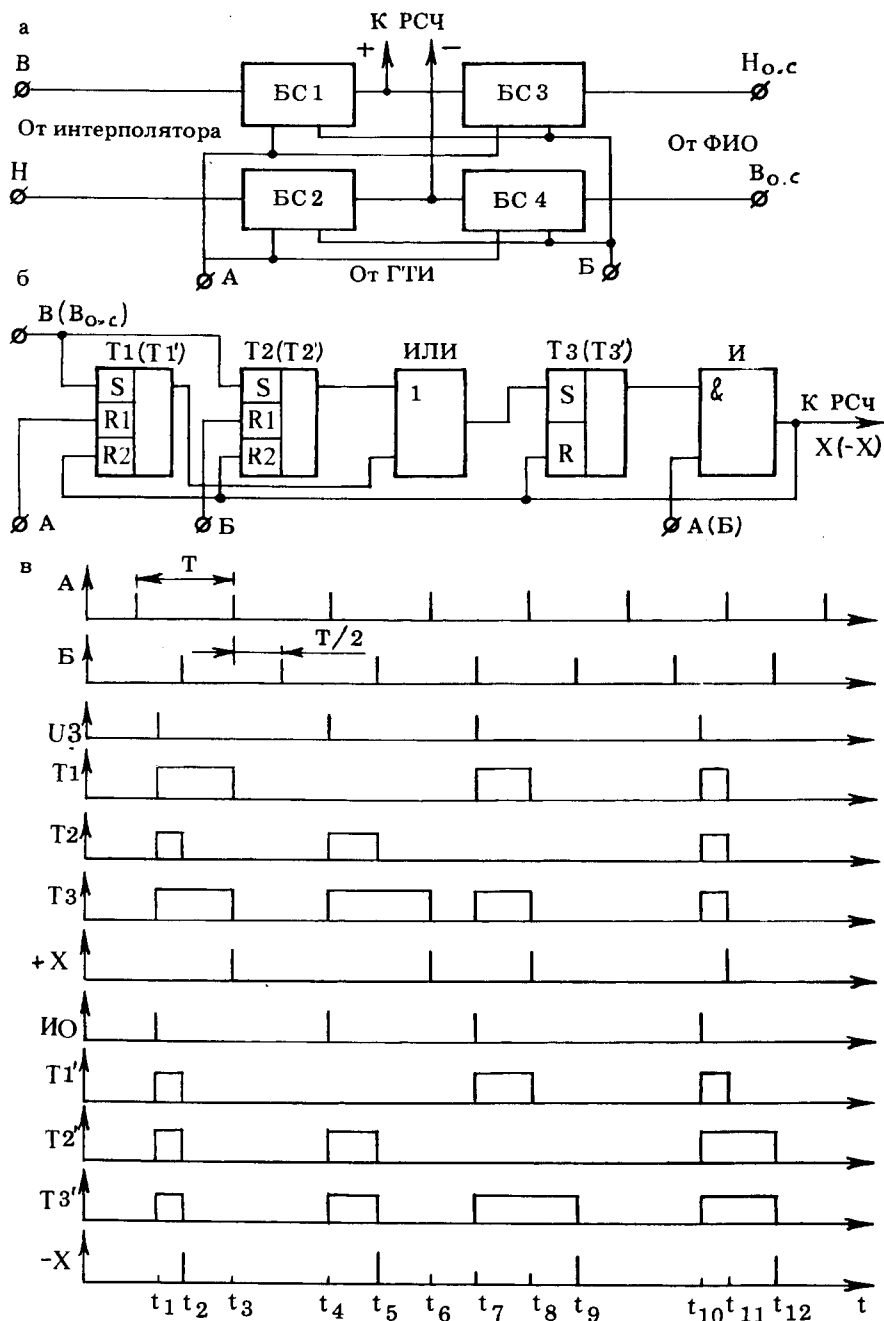


Рис. 8.3. Схема синхронизации:

а – структурная схема; б – схема блока БС1 (БС4); в – временные диаграммы.

В ω_c в момент времени t_1 триггеры Т1, Т2, Т1' и Т2' установятся в состояние 1. Выходные сигналы с триггеров Т1, Т2 проходят через схему ИЛИ и устанавливают в состояние 1 триггер Т3 блока БС1. Аналогично в положение 1 установятся и триггер Т3' блока БС4. В результате схемы И в обоих блоках БС1 и БС4 оказываются открытыми потенциальными сигналами с триггеров Т3 и Т3'. Серии тактирующих импульсов А и Б поступают от ГТИ равномерно с частотой $f_{т.и} = 1/T$, значительно превышающей максимальную частоту импульсов задания f_z и импульсов отработки $f_{\omega.c}$. Серии импульсов А и Б сдвинуты относительно друг друга на половину периода тактовых импульсов $T/2$ и поэтому никогда не совпадают во времени.

В рассматриваемом случае в момент t_2 появится импульс серии Б и на выходе блока БС4 появится сигнал $-X$, поступающий на вход вычитания реверсивного счетчика РСч. Одновременно по цепи обратной связи триггеры Т1', Т2' и Т3' будут переброшены в состояние 0. Триггер Т2 блока БС1 также устанавливается в положение 0 при появлении импульса серии Б, но триггеры Т1 и Т3 остаются в положении 1. Когда в момент t_3 появится ближайший импульс серии А, на выходе блока БС1 сформируется импульс X, поступающий на вход сложения реверсивного счетчика. Таким образом, одновременно возникшие на входах СС импульсы задания и отработки поступают на соответствующие входы реверсивного счетчика со сдвигом во времени, равным сдвигу между импульсами серий А и Б (т.е. половине периода ГТИ).

На рис. 8.3 показаны также случаи совпадения во времени в момент t_4 импульсов ИЗ, ИО и А, а в момент t_5 — импульсов ИЗ, ИО и Б. Как видно, происходит разделение во времени импульсов X и $-X$, поступающих на входы сложения и вычитания РСч.

Система управления предусматривает определенную цену ИЗ и ИО. Поэтому код рассогласования выражает разность заданного и фактического перемещений РО $N_\delta = k(s_z - s) = k\delta s$.

Преобразователь "код—напряжение" (ПКН) переводит код рассогласования в аналоговый сигнал U_δ в соответствии с характеристикой, приведенной на рис. 8.2, б.

В простейшем случае при П-регуляторах положения (РП) и скорости (РС) выходное напряжение регулятора скорости может быть представлено в виде

$$U_{p.c} = \beta_1 (T_k p + 1) \delta s,$$

где $\beta_1 = \beta_{p.n} \beta_{p.c}$; $\beta_{p.n} = \frac{U_{p.n}}{\delta s}$; $T_k = \frac{k}{\beta_{p.n}}$; $k = \frac{U_f}{\omega_z} = \frac{U_\omega}{\omega}$; $\beta_{p.c}$ — коэф.

фициент усиления регулятора скорости. Постоянная времени T_k подбирается с таким расчетом, чтобы частично компенсировать инерционность объекта регулирования.

Напряжение $U_{p.c}$ определяет ЭДС силового вентильного преобразователя (СВП) e_n . Электродвигатель представлен на рис. 8.2 элементами Д1, Д2 и Д3, выходными сигналами которых являются соответственно сигнал, пропорциональный току якоря $x = iR_o$, ЭДС двигателя $e = c\omega$ и угол поворота вала дви-

гателя a . Сигнал $x_c = I_c R_0$ пропорционален статическому току нагрузки. Если для упрощения пренебречь возмущением x_c и принять СВП с коэффициентом усиления β_n безынерционным, то операторное уравнение системы примет вид

$$s = \frac{s_3 (T_k p + 1)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (8.1)$$

где $a_3 = \frac{k_p \theta T}{\beta}$; $a_2 = \frac{k_p \theta}{\beta}$; $a_1 = \frac{k_p + \beta T_k}{\beta}$; $\beta = \beta_1 \beta_n$; $k_p = e/ps$; T, θ —

электромагнитная и электромеханическая постоянные привода. Подбирая постоянную T_k , можно свести уравнение (8.1) к системе второго порядка.

8.3. ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫЕ СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Упрощенная функциональная схема фазовой системы ЧПУ приведена на рис. 8.4. Для управления одной координатой на МЛ используются две дорожки. На одной дорожке записывается опорный сигнал $U_o = U_m \sin \omega t$, а на другой — рабочий $U_p = U_m \sin(\omega t + \varphi)$. Сигналы считывающей магнитной головки (СМГ) усиливаются усилителями опорного и рабочего сигналов (УОС и УРС). Величина и направление перемещения РО задаются фазой φ рабочего сигнала.

При постоянном задании ($\varphi = \text{const}$) РО перемещается в положение, соответствующее повороту ротора двигателя на угол $\alpha \approx \varphi$. ДОС выполняется в виде вращающегося трансформатора, на первичные обмотки которого через формирователь напряжений (ФН) поступают напряжения U_{01} и U_{02} , сдвинутые относительно друг друга на 90° (электр.). Во вращающемся трансформаторе создается вращающееся с частотой ω магнитное поле, образующее на выходе датчика напряжение обратной связи, начальная фаза которого зависит от положения ротора $U_{o.c} = U_m \cos(\omega t + \alpha)$.

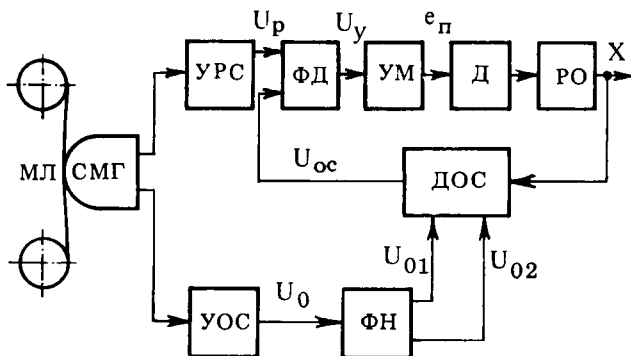


Рис. 8.4. Функциональная схема фазовой системы ЧПУ.

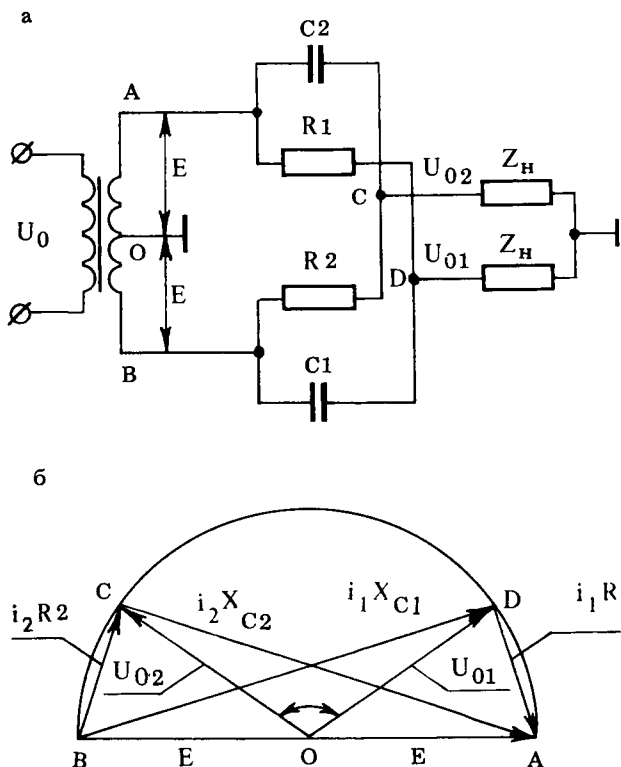


Рис. 8.5. Схема (а) и векторная диаграмма (б) ФН.

Напряжения задания U_p и обратной связи $U_{o.c}$ поступают на вход фазового дискриминатора (ФД), который в первом приближении можно рассматривать как устройство умножения.

Перемножение сигналов дает $\sin(\omega t + \varphi) \cos(\omega t + \alpha) = \frac{1}{2} \sin(\varphi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t + \varphi + \alpha)$. Следовательно, если ФД снабжен фильтром, не пропускающим переменную составляющей, то напряжение на его выходе $U_y = kU_m \sin(\varphi - \alpha)$. При малом рассогласовании $\Delta\alpha = \varphi - \alpha$

$$U_y = U_{y \max} \Delta\alpha.$$

Сигнал управления U_y поступает на вход усилителя мощности (УМ), вырабатывающего ЭДС преобразователя e_n , под действием которой электродвигатель (Д) перемещает РО, стремясь устранить имеющееся рассогласование $\Delta\alpha$.

Схема и векторная диаграмма ФН даны на рис. 8.5. Здесь Z_H — сопротивление нагрузки (первичных обмоток вращающегося трансформатора). Подбором сопротивлений $R1, R2$ и емкостей $C1, C2$ можно (рис. 8.5, а) менять ве-

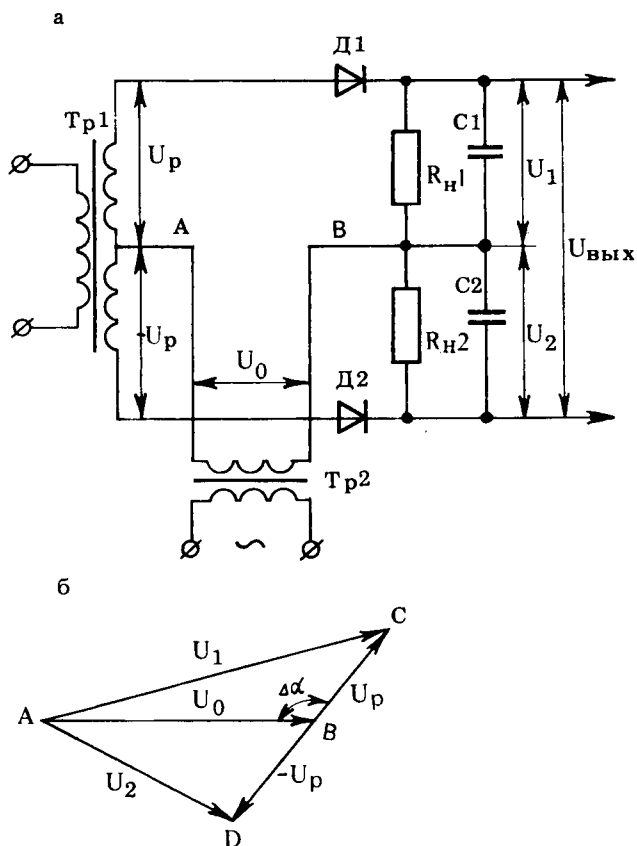


Рис. 8.6. Схема (а) и векторная диаграмма (б) балансного фазового дискриминатора.

личину сдвига между выходными напряжениями U_{01} и U_{02} . На рис. 8.5, б $i_1 R_1, i_2 R_2, i X_{C1}, i X_{C2}$ — падения напряжения соответственно на активных сопротивлениях R_1, R_2 и емкостных реактансах $X_{C1} = 1/\omega C_1, X_{C2} = 1/\omega C_2$. Векторная диаграмма построена при условии пренебрежения токами нагрузки в сопротивлениях Z_n .

Простейшим ФД является балансный фазовый дискриминатор, схема и векторная диаграмма которого показаны на рис. 8.6.

Рабочее напряжение $2U_p$ снимается со вторичных обмоток трансформатора Тр1, имеющего выведенную нулевую точку А. Диоды Д1, Д2 образуют две симметричные однополупериодные схемы выпрямления, нагруженные сопротивлениями $R_{н1}, R_{н2}$. Выходное напряжение $U_{вых}$ представляет собой разность падений напряжения на сопротивлениях $R_{н1}$ и $R_{н2}$. В диагональ схемы АВ включена вторичная обмотка опорного трансформатора Тр2 с напряжением U_0 .

Диоды Д1 и Д2 открыты соответственно при

$$U_1 = U_0 \sin(\omega t + \varphi) + U_p \cos(\omega t + \alpha) > 0;$$

$$U_2 = U_0 \sin(\omega t + \varphi) - U_p \cos(\omega t + \alpha) > 0.$$

Конденсаторы С1 и С2 являются фильтрами, поддерживающими напряжение на выходе в части периода, когда диоды Д1 и Д2 заперты.

Постоянная составляющая выходного напряжения приближенно равна

$$U_{\text{вых}} = 2U_{p.cр} \cos \Delta \alpha,$$

где $U_{p.cр}$ — среднее за полупериод значение рабочего напряжения; $\Delta \alpha = \alpha - \varphi$ — фазовый сдвиг рабочего напряжения относительно опорного.

Импульсно-фазовые системы во многом аналогичны рассмотренным фазовым. В отличие от фазовых в них используются несинусоидальные и импульсные (близкие к прямоугольным) сигналы: опорные, рабочие и обратной связи.

Схема такой системы приведена на рис. 8.7. Основными элементами схемы являются: ГТИ, импульсно-фазовый преобразователь (ИФП), измеритель рассогласования (ИР), аналоговая часть системы управления ЭП, РО, ДОС с вращающимся трансформатором (ВТ) и формирователем импульсов (ФИ), формирователь напряжения (ФН) для питания первичных обмоток ВТ, ПНЧ. Наличие этих элементов создает в системе комбинированное управление.

ГТИ вырабатывает две последовательности импульсов А и Б с частотой $f_{оп} = 1/T_{оп}$. Импульсы последовательностей А и Б сдвинуты во времени на полпериода $0,5T_{оп}$.

Опорная частота $f_{оп}$ значительно больше частоты следования импульсов программы $f_{пр}$, поступающих от интерполятора по входам В (для движения "Вперед") или Н (для движения "Назад").

ИФП содержит блоки синхронизации БС1 и БС2, на входы которых поступают импульсы программы и тактовые импульсы серии Б. С помощью делителя опорной частоты (ДОЧ) и делителя частоты координаты (ДЧК) ИФП образует сигналы с частотой $f_0 = f_{оп}/N$ и $f_k = f_0 \pm f_{п}$, где N — коэффициент деления делителей ДОЧ и ДЧК.

При движении вперед импульсы с частотой $f_{пр}$ поступают по входу В. При этом триггер Т со счетным входом находится в положении 0. На его инверсном выходе имеется потенциальный сигнал логической 1, вследствие чего ключ К1 открыт, и импульсы серии А проходят на схему ИЛИ1 и затем на вход ДЧК. Импульс программы, поступающий на вход блока БС1, синхронизируется импульсами серии Б, т.е. на выходе БС1 импульс программы появляется со сдвигом во времени (одновременно с ближайшим последующим импульсом серии Б). Этот импульс также проходит через схему ИЛИ1 на вход ДЧК. В результате на выходе ДЧК образуется сигнал задания координаты с частотой $f_k = f_{оп} + f_{пр}/N = f_0 + f_{п}$

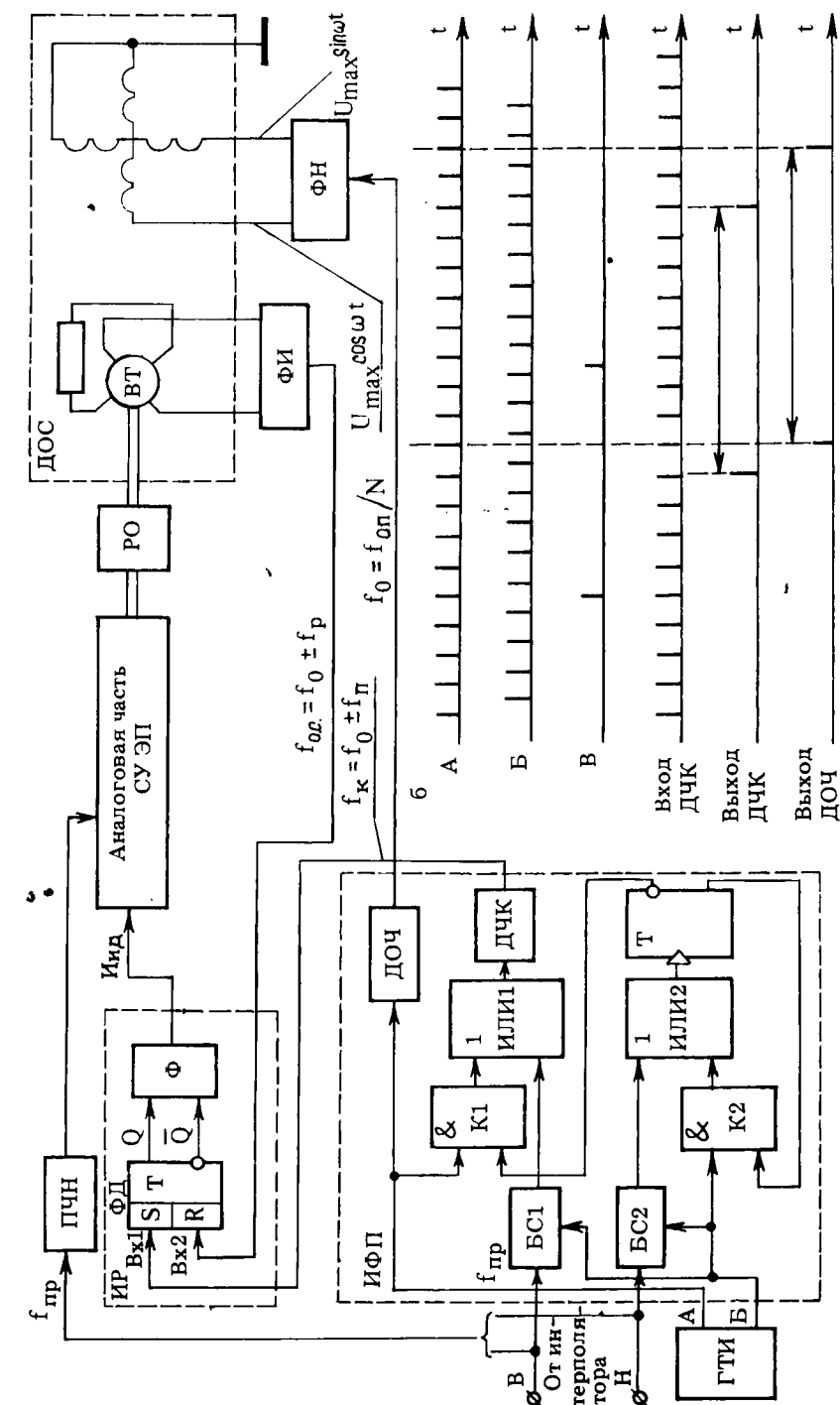


Рис. 8.7. Функциональная схема (а) и временные диаграммы (б) импульсно-фазовой системы ЧПУ.

Программный импульс "Назад" появляется одновременно с ближайшим импульсом серии *Б* на выходе БС2 и затем через схему ИЛИ2 – на счетном входе триггера Т. Триггер перебрасывается в положение 1, ключ К1 запирается, и очередной импульс серии *А* не доходит до ДЧК. Одновременно отпирается ключ К2 и последующий импульс серии *Б* снова устанавливает триггер в положение 0. Таким образом, при движении "Назад" на выходе ДЧК появляется сигнал частотой $f_k = f_{оп} - f_{пр} / N = f_0 - f_n$.

Импульсный сигнал с выхода ДОЧ поступает на ФН, преобразующий входной сигнал в напряжения $U_{max} \sin \omega t$ и $U_{max} \cos \omega t$, где $\omega = 2\pi f_0$. Эти напряжения подводятся к обмоткам возбуждения вращающегося трансформатора, в котором создается магнитное поле, вращающееся с частотой ω . Вращающееся поле создает в обмотках ротора ЭДС, фаза которой зависит от положения ротора. ФИ преобразует ЭДС ротора в импульсный сигнал с частотой $f_{о.с} = f_0 \pm f_p$, где f_p – частота, зависящая от скорости вращения ротора ($\omega_p = 2\pi f_p$). Частота $f_p \cong f_n$.

Образование импульсных сигналов на выходах ИФП при работе "Вперед" показано на рис. 8.7, б, где коэффициент деления $N = 10$, что значительно меньше реально применяемых значений ($N = 100-200$ и больше). На выходах ДОЧ и ДЧК появляется каждый десятый из поступивших на вход импульсов. Аналогично образуется импульсный сигнал обратной связи.

Сигнал задания координаты ($U_{з.к}$) с выхода ДЧК и сигнал обратной связи $U_{о.с}$ с выхода ФИ поступают на входы ИР, состоящего из ФД и фильтра (Ф). Сигналы $U_{з.к}$ и $U_{о.с}$ не являются синусоидальными, а представляют собой последовательность узких прямоугольных импульсов.

Периоды (T_k и $T_{о.с}$) появления этих импульсов вследствие достаточно большого коэффициента деления N делителей частоты мало отличаются от периода T_0 сигнала, получаемого с выхода ДОЧ. Если принять, что периоду T_k сигнала задания координаты соответствует фазовый угол 2π (или 360°), то интервалу между появлением импульса $U_{з.к}$ и ближайшего импульса обратной связи $U_{о.с}$ будет соответствовать некоторый фазовый угол φ .

ФД представляет собой RS-триггер, который преобразует импульсные сигналы в ступенчатые сигналы Q и $\bar{Q}$ на выходах триггера.

Напряжение триггера $U_T = QVQ$ поступает на вход фильтра Ф, образующего напряжение $U_{ир} = U_{т.ср}$, которое оказывается пропорциональным фазовому углу φ . Примерный вид временных диаграмм и статической характеристики ИР показан на рис. 8.8.

При $\varphi = \pi$ напряжение на выходе измерителя рассогласования $U_{ир} = 0$. Это соответствует заданному положению РО. Напряжение рассогласования подается на вход регулятора положения в аналоговой части системы управления электроприводом. При рассогласовании $\varphi > 2\pi$ знак $U_{ир}$ изменяется на обратный, и вместо необходимого ускорения движения РО подается сигнал на его замедление. Правильная работа системы нарушается.

Разрешающая способность фазовой системы, т.е. минимальное изменение

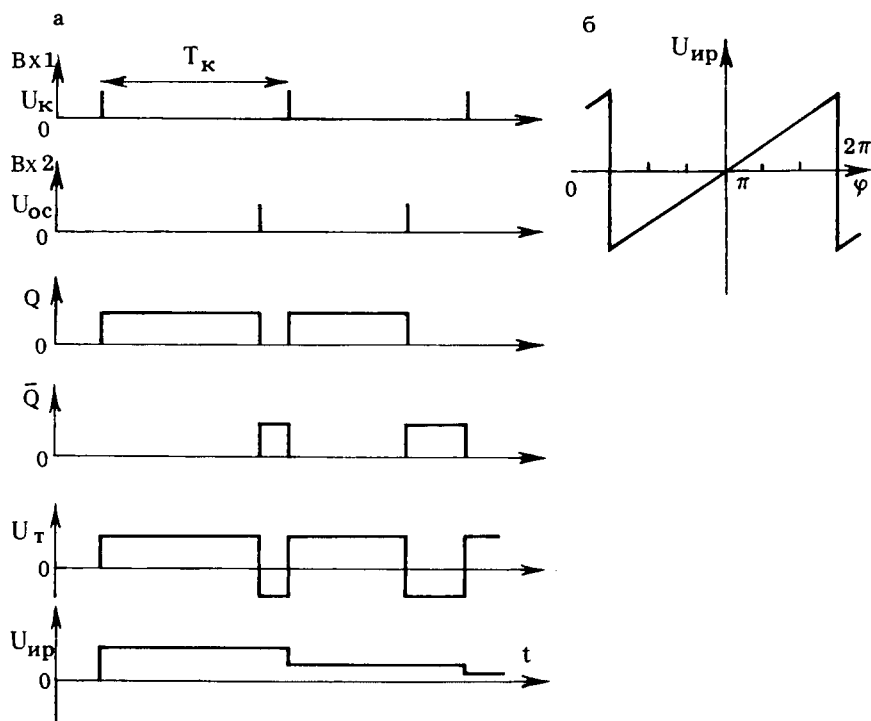


Рис. 8.8. Временные диаграммы (а) и статическая характеристика измерителя рассогласования (б).

фазового угла $\Delta\varphi_{раз}$, которое может быть измерено ДОС, не должна быть больше цены импульса по фазе.

Сдвиг во времени между импульсами сигналов задания U_3 и обратной связи $U_{о.с}$:

$$\Delta T = \frac{N_{пр} - N_{о.с}}{f_{оп}},$$

где $N_{пр}$, $N_{о.с}$ — число импульсов программы и обратной связи, поступающих за время, соответствующее периоду командных импульсов T_K ,

$$T_K = \frac{N - N_{пр}}{f_{оп}}.$$

Фазовый сдвиг импульсов U_3 и $U_{о.с}$

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta T}{T_K}.$$

Так как $N \gg N_{\text{пр}}$, цена импульса, получаемая при $N_{\text{пр}} - N_{\text{о.с}} = 1$, оказывается обратно пропорциональной коэффициенту деления: $\Delta\varphi = 2\pi/N$.

8.4. ПОЗИЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Позиционные системы ЧПУ решают сложную противоречивую задачу, состоящую в обеспечении высокой точности перемещения РО за минимальное время. Величина перемещения РО может варьировать в достаточно широких пределах. Однако для реальной позиционной системы обычно исходят из некоторого базового перемещения s_6 , которое может быть выбрано как наиболее вероятное или характерное для ответственных операций, осуществляемых с помощью данного РО.

Важным показателем позиционной системы является относительная точность $\delta_0 = \Delta/s_6$, где Δ — разрешающая способность системы, т.е. минимальное перемещение, которое может быть измерено используемым в системе датчиком перемещения ДОС.

В позиционных системах с дискретными ДОС повышение относительной точности требует соответствующего увеличения числа разрядов цифровой части системы.

При использовании аналоговых (фазовых) ДОС повышение относительной точности достигается применением многоотсчетных систем. В частности, большое распространение получили двухотсчетные системы, представляющие собой сочетание системы грубого и точного отсчета. Система грубого отсчета управляет движением при больших перемещениях ($s_{6.\text{гр}}$) с низкой разрешающей способностью ($\Delta_{\text{гр}}$). Вблизи заданного положения РО, когда остающаяся часть пути становится равной $s_{6.\text{точ}}$, управление передается точной системе с разрешающей способностью $\Delta_{\text{точ}}$. При этом относительная точность обеих систем обычно одинакова:

$$\delta_{\text{о.гр}} = \Delta_{\text{гр}} / s_{6.\text{гр}} = \delta_{\text{о.точ}} = \Delta_{\text{точ}} / s_{6.\text{точ}}.$$

Позиционная система характеризуется также базовой скоростью перемещения $v_6 = s_6/t_6$, где t_6 — время, затрачиваемое на осуществление базового перемещения.

В современных позиционных системах металлорежущих станков с разрешающей способностью порядка $\Delta \cong 1$ мкм требуемая базовая скорость может составлять 0,1–0,2 м/с. Для реализации этих требований позиционные системы содержат блок формирования скорости, осуществляющий задание диаграммы скорости, обеспечивающей требуемое быстродействие.

Функциональная схема позиционного следящего ЭП с ЧПУ приведена на рис. 8.9. Задаваемые программой перемещения s_3 сравниваются в блоке сравнения (БСр) с сигналом обратной связи $s_{\text{о.с}}$. Сигнал рассогласования Δs преобразуется ЦАП в аналоговый сигнал ϵ_s , поступающий на вход блока формирования скоростей (БФС). На второй вход этого блока подается сигнал программы скоростей $v_{\text{пр}}$. БФС вырабатывает сигнал задания скорости v_3 , кото-

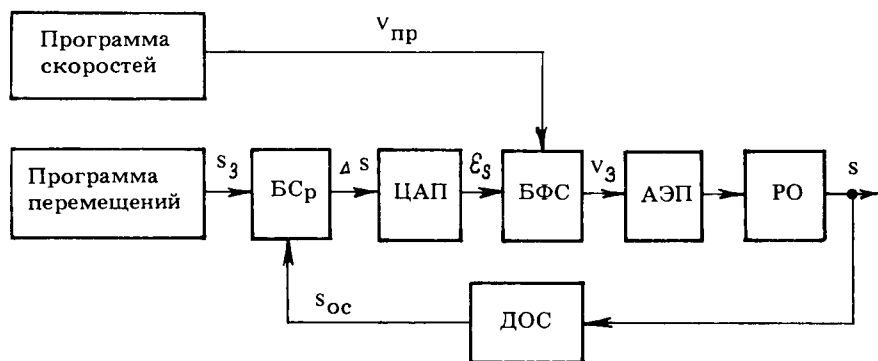


Рис. 8.9. Функциональная схема позиционного следящего ЭП с ЧПУ.

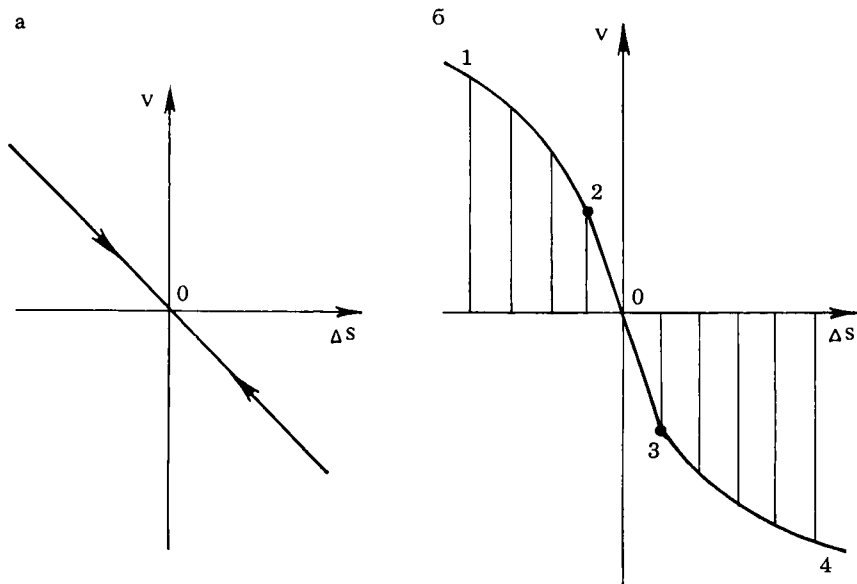


Рис. 8.10. Фазовые траектории обработки заданного перемещения:
а – при пропорциональном управлении скоростью; б – при параболическом.

рый управляет автоматизированным электроприводом (АЭП), приводящим в движение РО.

Для управления позиционной системой существенное значение имеет выбор фазовой траектории процесса замедления при подходе к заданному положению РО. Простейшая фазовая траектория имеет вид прямой линии. Она соответствует изменению скорости РО пропорционально отклонению $\Delta s_{от}$ от заданного положения: $v = -k \Delta s$. С другой стороны, $v = d\Delta s / (dt)$.

Дифференциальное уравнение, соответствующее такой фазовой траекто-

рии, имеет вид

$$\frac{d\Delta s}{dt} + k\Delta s = 0. \quad (8.2)$$

Из (8.2) следует

$$\Delta s = \Delta s_0 e^{-kt}; \quad v = v_0 e^{-kt}; \quad a = a_0 e^{-kt},$$

где Δs_0 , v_0 , a_0 — значения рассогласования, скорости и ускорения в момент $t = 0$; k — коэффициент усиления следящего привода по скорости; $v_0 = -k\Delta s_0$; $a_0 = k^2\Delta s_0 = -kv_0$. При $v_0 > 0$ Δs_0 и $a_0 < 0$ и, наоборот, при $v_0 < 0$ Δs_0 и $a_0 > 0$.

Варианты фазовых траекторий процесса отработки перемещения приведены на рис. 8.10. При пропорциональном управлении скоростью (рис. 8.10, а) длительность отработки заданного перемещения равна бесконечности, так как при подходе к заданному положению скорость и ускорение стремятся к нулю.

Снижение скорости от начального значения v_0 до некоторого значения v_k при этом способе управления происходит за время

$$t_1 = \frac{v_0}{a_0} \ln (v_0/v_k).$$

Для повышения быстродействия позиционной системы используют управление с постоянным значением ускорения a . В этом случае реализуется параболический закон изменения скорости в функции рассогласования:

$$v = \sqrt{2a\Delta s} (-\text{sign } \Delta s). \quad (8.3)$$

При параболическом законе (8.3) с уменьшением Δs необходимо увеличивать коэффициент усиления системы $k = v / (\Delta s) = \sqrt{2a\Delta s} / (\Delta s)$. При $\Delta s \rightarrow 0$ $k \rightarrow \infty$.

Реализовать позиционную следящую систему с $k = \infty$ невозможно. Поэтому практически в позиционных системах применяют управление, которому соответствует фазовая траектория процесса замедления (рис. 8.10, б), состоящая из параболического участка 1–2 или 3–4 и пропорционального участка 2–0 или 3–0.

Время, необходимое для снижения скорости до значения v_k при постоянном замедлении $a = a_0$:

$$t_2 = \frac{v_0 - v_k}{a_0} \cong \frac{v_0}{a_0}.$$

Сравнивая t_2 с t_1 , получаем $t_1/t_2 = \ln(v_0/v_k)$. Если конечная скорость $v_k = 0,01v_0$, то $t_1 = 4,6t_2$. При $v_k = 0,001v_0$ $t_1 = 6,9t_2$. Приведенные цифры показывают, что применение параболического управления торможения позволяет повысить быстродействие системы по сравнению с пропорциональным.

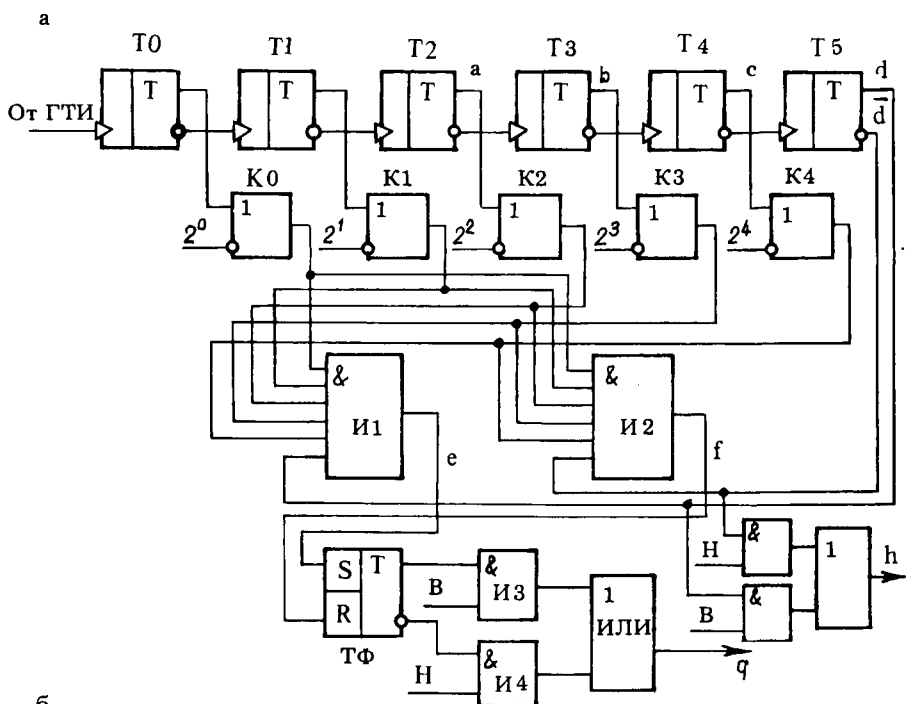


Рис. 8.11. Схема (а) и временные диаграммы (б) преобразователя "код-фаза".

БФС (см. рис. 8.9) при непрерывном управлении представляет собой нелинейный функциональный преобразователь, воспроизводящий желаемую фазовую траекторию с учетом ограничений по максимальной скорости и максимальному коэффициенту усиления.

ДОС может быть кодовым, импульсным или фазовым. Если ДОС кодовый, то блок сравнения производит периодическое вычисление разности кода задания s_3 и кода обратной связи, которая в течение периода (до вычисления следующего значения разности Δs) остается постоянной. Для импульсного ДОС в качестве блока сравнения используется реверсивный счетчик (РСч). Заданные кодом программы перемещения вводятся в РСч параллельным арифметическим кодом (например, двоичным). Импульсы обратной связи в зависимости от направления движения РО поступают на вход сложения или вычитания РСч.

В позиционной системе с фазовым ДОС числовой двоичный код заданного перемещения преобразуется в аналоговый сигнал, представляющий собой фазовый сдвиг (фазу) сигнала программы относительно периодического опорного сигнала. Преобразование "код-фаза" осуществляется по схеме, представленной на рис. 8.11. Преобразователь состоит из двоичного делителя частоты (ДЧ), содержащего триггеры Т0–Т5, ключей К0–К4, схем совпадения И1–И4, схемы ИЛИ, триггера формирователя (ТФ) и схемы формирования опорного сигнала h . Пусть система ЧПУ задает перемещение в двоичном коде 10100 элементарных шагов. На входы 2^2 и 2^4 ключей К2 и К4 подается сигнал логической 1, а на входы 2^0 , 2^1 и 2^3 — сигнал логического 0, вследствие чего с выхода ключей К0, К1 и К3 на входы схем совпадения И1, И2 поступают сигналы логической 1.

При этих условиях для появления сигналов f и e на выходах И1 и И2 необходимо выполнение логических равенств: $e = acd$; $f = acd$.

На рис. 8.11 показаны упрощенные временные диаграммы формирования сигналов e , f и выходных сигналов d , q . Триггер Т2 перебрасывается в противоположное состояние каждым четвертым тактовым импульсом. При переходе из положения 1 в положение 0 на выходе появляется импульс связи, поступающий на счетный вход триггера следующего разряда.

При движении "Вперед" опорный сигнал h совпадает с сигналом d с выхода триггера Т5. При движении "Назад" сигнал h совпадает с сигналом $\bar{d}$ с инверсного выхода триггера Т5.

Независимо от заданного направления движения выходной сигнал q отстает от опорного. Для рассмотренного случая это отставание составляет 20 элементарных шагов (импульсов ГТИ). Для приведенного преобразователя полный период, соответствующий емкости делителя частоты, равен $2^n = 2^5 = 64$ импульса ГТИ. Следовательно, фаза выходного сигнала q по отношению к опорному h составляет в данном случае $\varphi = \frac{20}{64} 2\pi = \frac{5}{8} \pi = 112,5^\circ$.

При движении "Вперед" выходной сигнал формируется схемой И3 в момент, когда триггер формирователя (ТФ) устанавливается в положение 1. При движении "Назад" сигнал проходит через схему И4, когда ТФ находится в положении 0.

9. ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗАДАННЫХ ДВИЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

9.1. НАСТРОЙКА ПОЗИЦИОННЫХ ПРИВОДОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАДАННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

9.1.1. Привод подачи

Позиционные приводы находят широкое применение в промышленных установках: станках с ЧПУ, в промышленных роботах и манипуляторах, в гибких автоматизированных системах. Исполнительные двигатели таких приводов (чаще всего электрические) обладают мощностью от единиц и десятков ватт до десятков и сотен киловатт. Питание двигателей осуществляется от полупроводниковых преобразователей электрической энергии. Управление преобразователями и позиционным приводом обеспечивается с помощью СПУ. Наиболее характерные представители приводов — приводы подачи металлорежущих станков.

Привод подачи является одним из важнейших элементов металлорежущего станка, так как изделие приобретает требуемую форму благодаря совершенной инструменту заданного движения. Информация о пути и скорости пере-

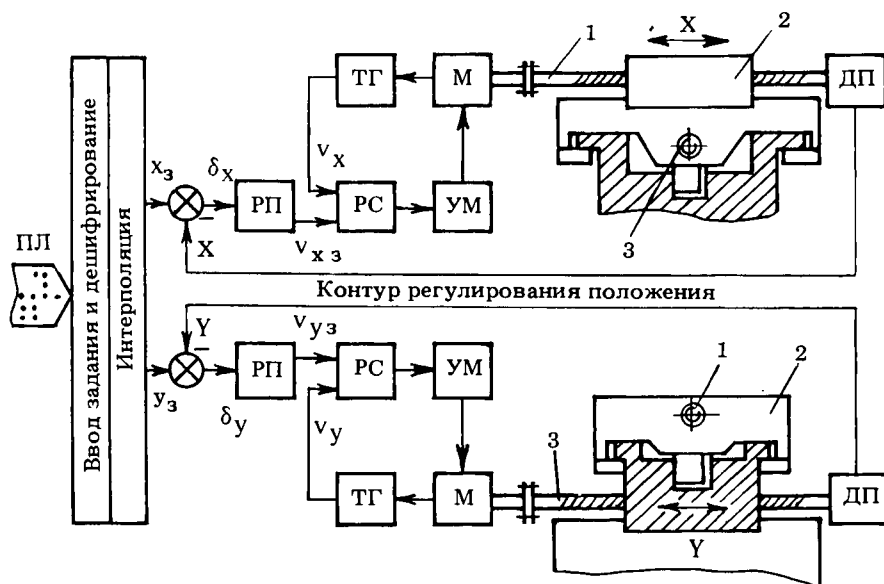


Рис. 9.1. Двухкоординатная система контурного регулирования:
1 — ходовой винт координаты X; 2 — стол; 3 — ходовой винт координаты Y.

мещения в станках с ЧПУ поступает в систему управления с носителей (перфоленты, магнитной ленты) (рис. 9.1). Система управления дешифрирует поступающую информацию и с помощью интерполятора посылает ее на приводы подач в виде сигнала задания. В данном случае приводы подач осуществляют относительное перемещение инструмента и обрабатываемой детали.

Двигатель привода подачи совершает с определенной скоростью ответную обработку углового перемещения, которое с помощью механических передаточных элементов "преобразуется" в соответствующее положение инструмента, обрабатываемой детали и элемента станка.

С учетом требований, предъявляемых к производимым изделиям, приводы подач должны проектироваться и изготавливаться таким образом, чтобы задания по положению и скорости обрабатывались с наибольшей точностью и практически без запаздывания. В наибольшей степени это требование относится к приводам многокоординатных станков, у которых движения по координатам функционально связаны друг с другом. К приводам подач при этом предъявляется дополнительное требование, согласно которому их динамические характеристики должны быть одинаковы. Несоблюдение этого требования приводит к появлению ошибок в процессе обработки траекторий.

9.1.2. Требования, предъявляемые к приводам подач

К приводам подач предъявляется требование обработки заданных угловых и линейных перемещений с желаемой точностью. В табл. 9.1 приведены ориентировочные значения показателей качества. Так, высококачественные приводы подач системы ЧПУ должны соответствовать по всем трем показателям первому классу.

Требуемые диапазоны регулирования скорости при заданной равномерности движения весьма широки. Например, электроприводы подач металлорежущих станков должны обрабатывать перемещения величиной несколько метров с требуемой точностью и одновременно с этим обеспечивать равномерное движение во всем диапазоне регулирования скорости, равном 1 : 10 000.

Точность позиционирования зависит от свойств всей системы и определяется в области малых ("нулевых") перемещений. При этом следует учитывать влияние действующих нелинейностей. На качество системы при обработке малых перемещений влияют зоны нечувствительности усилителя мощности, механических передач, двигателя и датчиков перемещений. Качество электронных элементов таково, что свойства позиционного электропривода определяются в основном механической частью. Недостатки механической части могут быть устранены в определенной степени путем использования соответствующих способов регулирования.

Различают три типа приводов: 1) механическая часть привода представляет собой жесткую одномассовую систему. Возникающие моменты трения (зависящие и не зависящие от скорости движения) тормозят движение. Они воспринимаются системой как возмущающие воздействия и не оказывают существенного влияния на точность привода; 2) механическая система является многомассовой системой с гибкими связями, с неразрывными силовыми связями между элементами системы. Возникающие моменты сопротивления (зависящие и не зависящие от скорости) тормозят движение. Моменты трения,

Показатель качества	Класс (условно)		
	первый	второй	третий
Быстродействие (частота среза ω_d)	$\omega_d < 50 \text{ с}^{-1}$	$1 \text{ с}^{-1} < \omega_d < 50 \text{ с}^{-1}$	$\omega_d < 1 \text{ с}^{-1}$
Добротность по ускорению $D_\epsilon = \Delta \ddot{a} / \Delta a$	$D_\epsilon > 500 \text{ с}^{-2}$	$1 < D_\epsilon < 500 \text{ с}^{-2}$	$D_\epsilon < 1 \text{ с}^{-2}$
Точность (абсолютная ошибка $\Delta a, \Delta x$)	$\Delta a < 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$;	$0,2 \cdot 10^{-3} < \Delta a < 20 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$;	$\Delta a < 20 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$;
	$\Delta x < 0,05 \text{ мм}$	$0,05 < \Delta x < 0,5 \text{ мм}$	$\Delta x < 0,5 \text{ мм}$

зависящие от скорости и действующие на отдельные части, оказывают влияние на точность системы; 3) механическая система является многомассовой с гибкими связями, с разрывными силовыми связями между элементами системы. Наряду с моментами трения, не зависящими от скорости, проявляется действие зазоров, которое неблагоприятно сказывается на точности и устойчивости системы.

9.1.3. Структура позиционного привода

Обобщенная структура позиционного привода приведена на рис. 9.2. Основными элементами позиционного привода являются устройство управления, силовая часть, измерительные устройства.

В устройстве управления угловое положение ротора двигателя или положение РО (например, стола) φ сравнивается с заданным положением φ_3 . Результат сравнения представляет собой ошибку управления δ_φ . Этот сигнал подается на вход регулятора положения (РП). Кроме РП, устройство управления содержит регулятор скорости (РС) и регулятор тока (РТ). Таким образом, структура позиционного привода соответствует трехконтурной структуре. При $\delta_\varphi = 0$ стол занимает заданное положение.

Силовая часть состоит из усилителя мощности (УМ), электродвигателя (ЭД) и механического передаточного элемента (МПЭ). С помощью УМ и двигателя осуществляется преобразование вида энергии, с помощью МПЭ, например пары винт-гайка или реечно-зубчатой пары, вращательное движение ротора двигателя преобразуется в поступательное движение стола.

Измерительные устройства осуществляют измерение действительных значений координат системы: положения (стола или ротора двигателя), скорости ротора двигателя, тока якоря двигателя. Информация, полученная с помощью измерительных устройств, подается на регуляторы соответствующих координат. Основное требование, предъявляемое к позиционному приводу, заключается в том, что положение РО должно в наибольшей степени соответствовать

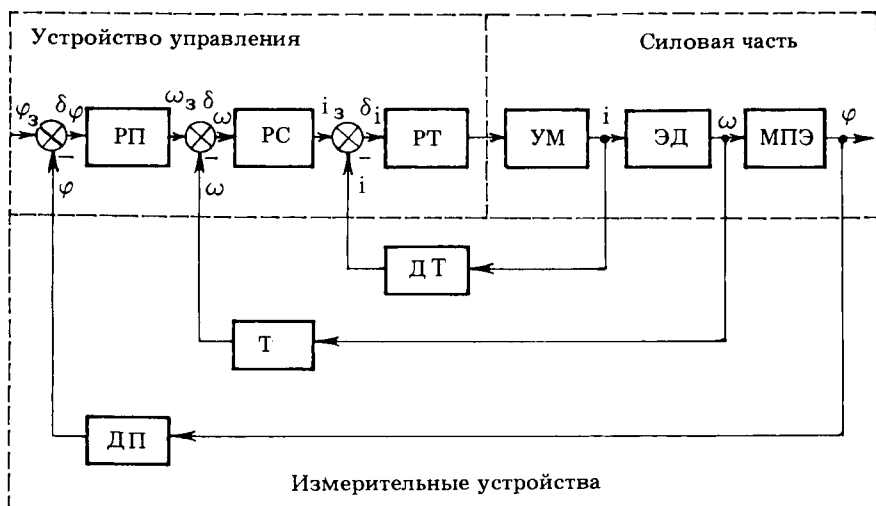


Рис. 9.2. Элементы позиционной системы.

заданному. Это требование может быть выполнено вследствие высоких коэффициентов усиления прямого канала контура регулирования и демпфирования, предотвращающего неустойчивость и перерегулирование в системе; малых постоянных времени привода; малых моментов инерции вращающихся частей; высокой частоты собственных механических колебаний; высокой жесткости элементов, осуществляющих передачу механических усилий; малого зазора в механических элементах; обеспечения соотношения $\omega_{0M}/\omega_{0P} > 2$, где ω_{0M} — собственная частота колебаний механической части системы; ω_{0P} — собственная частота контура регулирования.

В качестве устройства управления все большее применение находят цифровые вычислительные машины (ЦВМ на основе микропроцессоров — микроЭВМ). Система с ЦВМ в контуре управления является системой прямого цифрового управления типа DNC (рис. 9.3). Обработка информации в ЦВМ осуществляется в цифровой форме. На основании сигнала задания X_{zi} и измеренного значения регулируемой величины X_i вычисляется рассогласование. С помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) непрерывные сигналы X_{zi} и X_i преобразуются в цифровые. Вычислительное устройство циклически принимает входную информацию, определяет код рассогласования и в соответствии с алгоритмом управления производит вычисление кода управляющего воздействия U_i . Преобразованное с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) управляющее воздействие поступает на вход усилителя мощности (УМ). В тех случаях, когда быстродействие ЦВМ превышает скорость протекания управляемого технологического процесса, целесообразно с помощью одной вычислительной машины управлять несколькими объектами. Вычислительное устройство системы, управляющей несколькими приво-

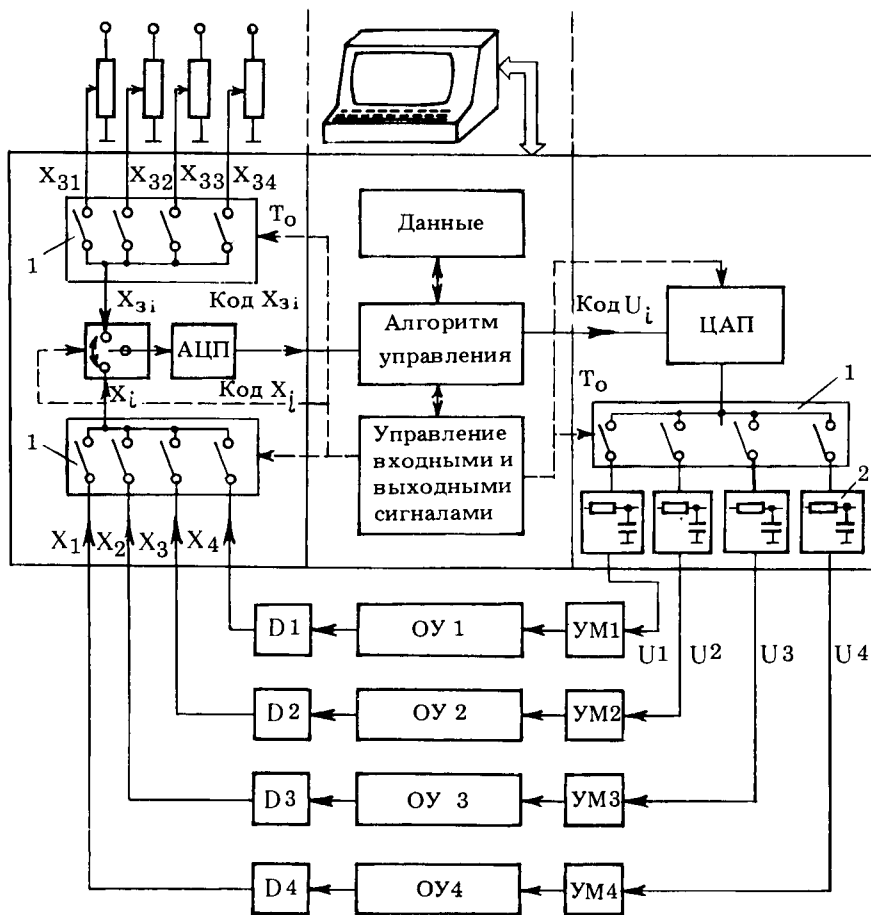


Рис. 9.3. Система непосредственного цифрового управления четырьмя объектами:
1 – коммутатор; 2 – элементы памяти.

дами подач, имеет соответствующее число процессоров, что вызвано необходимостью обеспечения высоких динамических характеристик позиционного привода.

9.1.4. Настройка аналоговых регуляторов

Для получения желаемых характеристик контура регулирования необходимо соответствующим образом определить и установить параметры регуляторов (Р), т.е. произвести их настройку. Целью настройки регуляторов являются: максимальное быстродействие контура регулирования, отсутствие перерегулирования и неустойчивых режимов работы. Определение параметров регуляторов может осуществляться несколькими методами. Один из них основывается на измерении переходной характеристики объекта управления (ОУ),

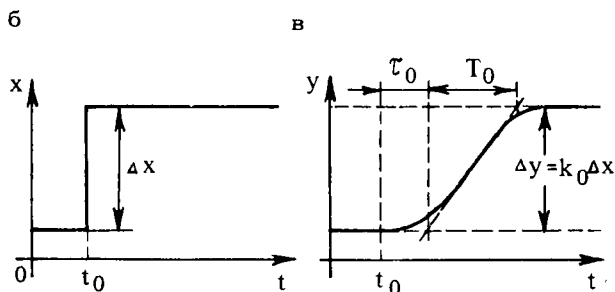
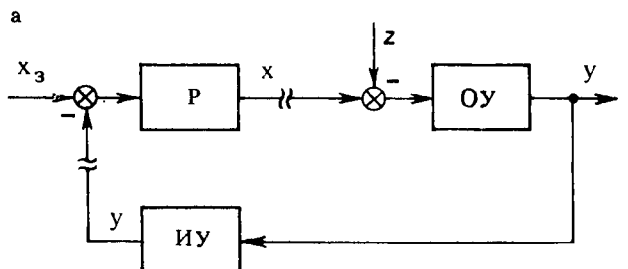


Рис. 9.4. Определение переходной характеристики объекта управления:
а – структурная схема; б – ступенчатое воздействие; в – переходная характеристика.

Таблица 9.2

Регулятор		Настройка регулятора		
тип	передаточная функция	параметр	переходная характеристика апериодическая	перерегулирование составляет 20 %
П	$W(p) = k_p$	k_p	$\frac{0,3}{k_0} \frac{T_0}{\tau_0}$	$\frac{0,7}{k_0} \frac{T_0}{\tau_0}$
ПИ	$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} p} \right)$	k_p $T_{\text{и}}$	$\frac{0,35}{k_0} \frac{T_0}{\tau_0}$ $1,2 T_0$	$\frac{0,6}{k_0} \frac{T_0}{\tau_0}$ T_0
ПИД	$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} p} + T_{\text{д}} p \right)$	k_p $T_{\text{и}}$ $T_{\text{д}}$	$\frac{0,6}{k_0} \frac{T_0}{\tau_0}$ T_0 $0,5 \tau_0$	$\frac{0,95}{k_0} \frac{T_0}{\tau_0}$ $1,35 T_0$ $0,47 \tau_0$

Регулятор	k_p	T_i	T_d
П	$0,5 k_k$	—	—
ПИ	$0,45 k_k$	$0,85 T_k$	—
ПИД	$0,6 k_k$	$0,5 T_k$	$0,12 T_k$

включающего также усилитель мощности и измерительное устройство (ИУ) (рис. 9.4).

На основе измеренной переходной характеристики определяют время запаздывания τ_0 и время разгона T_0 , которые совместно с коэффициентом усиления $k_0 = \Delta y / \Delta x$ определяют динамические и статические характеристики объекта. Если время запаздывания и время выравнивания удовлетворяют отношению $T_0 / \tau_0 > 3$, то параметры регуляторов могут быть рассчитаны с помощью табл. 9.2.

Другой метод настройки регуляторов основывается на данных, получаемых при экспериментировании с замкнутым контуром регулирования. В системе независимо от типа регулятора сначала используется П-регулятор. Коэффициент усиления П-регулятора увеличивают до тех пор, пока в системе не появятся колебания, т.е. пока она будет находиться на границе устойчивости. При этом коэффициент усиления П-регулятора k_k и период устойчивых колебаний T_k служат основой для определения параметров регуляторов (табл. 9.3).

9.1.5. Настройка привода подачи

В настоящее время в приводах подач чаще всего применяются электродвигатели постоянного тока специального исполнения, например высокомоментные двигатели. Они обладают очень высокими статическими и динамическими характеристиками. Функциональная схема привода подачи с двигателем постоянного тока приведена на рис. 9.5. Регулирование привода осуществляется с помощью регулятора положения и двух подчиненных ему регуляторов — скорости и тока. Измерение положения РО, например стола, осуществляется инкрементальным измерителем положения (ИИП). Сигналы обратной связи z и задания z_3 в виде последовательности импульсов поступают на вход реверсивного счетчика, на выходе которого формируется (в цифровом виде) ошибка регулирования (рассогласование) δ_z . Преобразованный с помощью ЦАП сигнал ошибки поступает на вход аналогового РП. Тип регуляторов зависит от числа инерционных элементов и их характеристик. На основании известных правил функциональная схема привода подачи преобразуется в структурную (см. рис. 9.5). Здесь РП пропорциональный, он усиливает ошибку регулирования δ_z и преобразует ее в задание для контура регулирования скорости. РС в свою очередь формирует задание контуру РТ.

При введении обратных связей по скорости и току значительно улучшается динамика привода и устраняется перерегулирование из-за увеличения коэф-

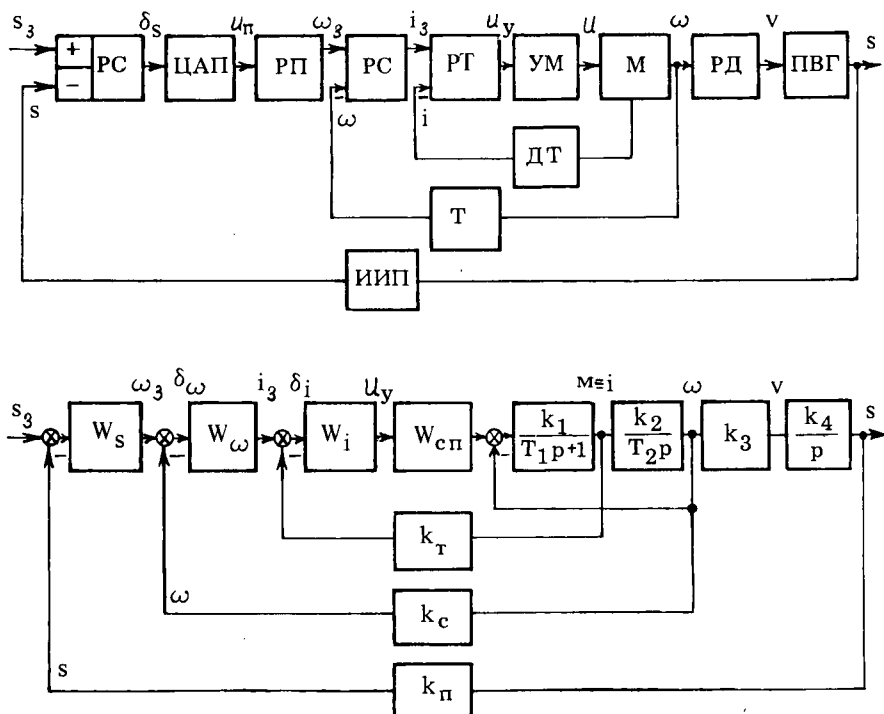


Рис. 9.5. Функциональная и структурная схемы позиционной системы.

фициента демпфирования. В приведенной схеме (см. рис. 9.5) РС и РГ являются ПИ-регуляторами. С помощью РГ осуществляется управление ускорением двигателя, благодаря чему уменьшается перерегулирование скорости при разгоне и торможении. Приведенная схема является линейной моделью привода подачи и учитывает его основные свойства.

Для определения основных параметров контура регулирования положения воспользуемся упрощенной структурной схемой привода подачи (рис. 9.6). На схеме двигатель постоянного тока независимого возбуждения приближенно представлен инерционным звеном первого порядка. Его передаточная функция имеет вид

$$W_M(p) = \frac{k_M}{Tp + 1}.$$

Постоянная времени T определяется в соответствии с выражением

$$T = \frac{(J_M + J_{\Pi}) \omega_0}{M_{\Pi}},$$

где J_M — момент инерции якоря двигателя; J_{Π} — приведенный момент инер-

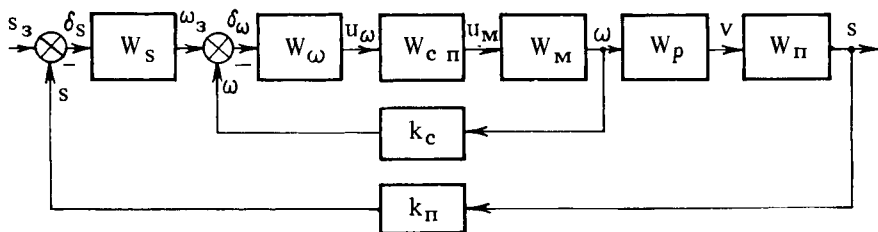


Рис. 9.6. Структурная схема упрощенной системы позиционирования с контуром регулирования скорости.

ции механизма; ω_0 — скорость идеального холостого хода; $M_{п}$ — пусковой момент.

С помощью редуктора и кинематической пары "винт-гайка" вращательное движение якоря двигателя с частотой вращения ω преобразуется в поступательное движение стола со скоростью v . Перемещение s может быть получено формальным интегрированием скорости движения: передаточные функции редуктора W_p и пары "винт-гайка" $W_{п}$ имеют соответственно выражения k_3 и k_4/p . Устройства, служащие для измерения скорости и перемещения, а также усилители мощности принимаются безынерционными с коэффициентами передачи k_c , $k_{п}$ и $k_{и}$. Регуляторами положения и скорости являются пропорциональные регуляторы с передаточными функциями $W_s = k_s$, $W_{\omega} = k_{\omega}$.

Определим влияние контура регулирования скорости с помощью передаточной функции позиционной системы при наличии регулятора скорости. Передаточная функция контура регулирования скорости

$$W_{p\omega}(\omega) = \frac{k_{\omega} k_{и} \frac{k_M}{Tp + 1}}{1 + k_{\omega} k_{и} \frac{k_M}{Tp + 1} k_c}$$

Передаточная функция контура регулирования положения

$$\begin{aligned} W_{p.п}(p) &= \frac{k_s W_{p\omega}(p) k_3 \frac{k_4}{p}}{1 + k_s W_{p\omega}(p) k_3 \frac{k_4}{p} k_{п}} = \\ &= \frac{1/k_{п}}{1 + \frac{1 + k_{\omega} k_s k_M k_c}{k_s k_{\omega} k_{и} k_M k_3 k_4 k_{п}} p + \frac{I}{k_s k_{\omega} k_{и} k_M k_3 k_4 k_{п}} p^2} \end{aligned}$$

Передаточная функция рассматриваемой позиционной системы идентична передаточной функции инерционного звена второго порядка:

$$W_2(p) = \frac{k}{1 + 2\frac{D}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2},$$

где ω_0 — частота собственных колебаний; D — коэффициент демпфирования.

Для позиционной системы ω_0 и D имеют значения, определяемые с помощью выражений:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_s k_\omega k_\Pi k_M k_3 k_4 k_\Pi}{T}}; \quad (9.1)$$

$$D = \frac{1}{2} \frac{1 + k_\omega k_\Pi k_M k_c}{\sqrt{k_s k_\omega k_\Pi k_M k_3 k_4 k_\Pi T}}. \quad (9.2)$$

Как следует из (9.1) и (9.2), коэффициент демпфирования контура регулирования положения может быть существенно увеличен за счет введения обратной связи по скорости, и частота собственных колебаний системы при этом не изменится.

Важнейшим параметром системы позиционирования является коэффициент усиления по скорости, или добротность системы по скорости D_v . Он представляет собой отношение скорости перемещения к ошибке позиционирования в установившемся режиме: $D_v = v/\delta_s$.

По добротности оценивается точность обработки системой траекторий движения на плоскости и в пространстве. Ошибка, возникающая при этом, пропорциональна v/D_v . Типичные значения D_v лежат в диапазоне 10–40 с⁻¹. Добротность следует приравнять коэффициенту усиления прямого канала контура регулирования. Она определяет ошибку регулирования при движении с постоянной скоростью и имеет большое значение при проектировании систем позиционирования для нескольких координат рабочей машины.

Характеристическая, или собственная, угловая частота ω_0 является мерой качества системы при передаче сигнала. Ее высокое значение свидетельствует о малых искажениях сигнала при прохождении через систему. В общем случае характеристическая частота системы позиционирования $f_0 = \omega_0/2\pi$ и находится в области 30 Гц.

Граничная частота контура регулирования положения — это частота синусоидального сигнала задания, при которой амплитуда сигнала на выходе системы в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитуды сигнала задания: $f_r \cong \frac{1}{2\pi} D_v$.

Коэффициент демпфирования D характеризует колебательные свойства системы. Чем выше коэффициент, тем слабее колебания. Желаемая величина коэффициента демпфирования приблизительно равна 0,7. Позиционная система с контуром регулирования скорости и без него идентична системе второго порядка. Однако ее переходная характеристика может быть существенно улучшена с помощью обратной связи по скорости. Как видно из рис. 9.7, в системе

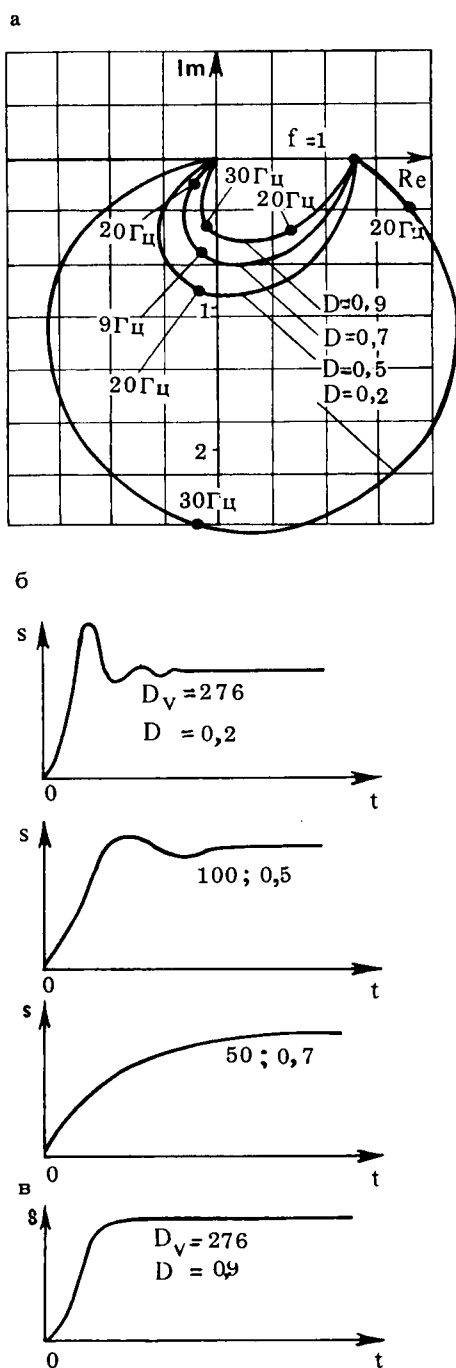
позиционирования без обратной связи по скорости коэффициент демпфирования увеличивается при уменьшении добротности, а это значит, что более высокое демпфирование можно получить путем уменьшения быстродействия системы.

В системе позиционирования с контуром регулирования скорости через коэффициент обратной связи по скорости k_c можно таким образом воздействовать на демпфирующие свойства системы, где требуемое качество регулирования (отсутствие перерегулирования, высокое быстродействие) обеспечивается при очень высоком значении добротности системы D_v .

Из рис. 9.7 следует, что в системе с обратной связью по скорости при коэффициенте демпфирования $D = 0,9$ можно добиться такого значения D_v , которое получают в системе без обратной связи только при коэффициенте демпфирования $D = 0,2$.

На рис. 9.8 приведены переходные характеристики позиционной системы с контуром регулирования скорости при различных значениях добротности системы. С увеличением D_v уменьшается ошибка регулирования по положению δ_s . При высоких значениях D_v при разгоне и торможении в результате уменьшения коэффициента демпфирования появляются колебания скорости. Значение добротности по скорости D_v ограничивают величиной, при которой быстродействие системы наибольшее, но перерегулирование (колебания) находятся в допустимых пределах.

Рис. 9.7. Амплитудно-фазовые (а) и переходные характеристики позиционной системы без обратной связи по скорости (б) и с обратной связью (в).



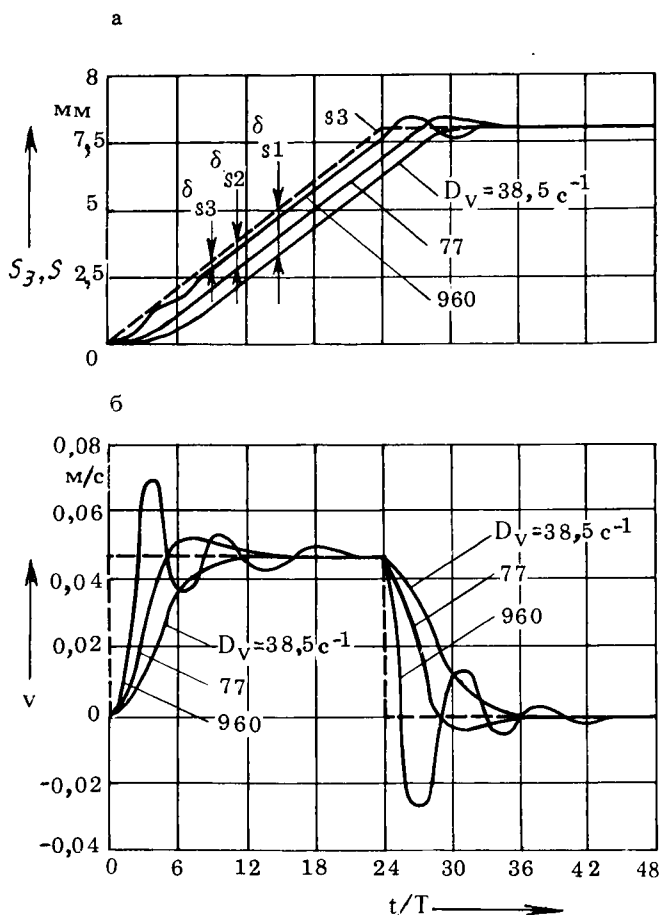


Рис. 9.8. Переходные характеристики позиционной системы (положение, скорость перемещения) в следящем режиме при $T = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$:

а – положение рабочего органа; б – скорость его перемещения.

9.2. ВЗАИМОСВЯЗАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

На рис. 9.1 приведена структурная схема двухкоординатной контурной системы металлорежущего станка. Задания по положению и скорости поступают с перфоленты на интерполирующее устройство, а затем в виде сигналов задания на входы контуров регулирования положения. При отработке системой заданий, поступающих с перфоленты, появляются ошибки, зависящие прежде всего от вида интерполяции и характеристик контуров регулирования положения. Отклонение действительной траектории движения стола от заданной может быть вызвано большими постоянными времени; различными коэффициентами усиления по скорости в контурах регулирования положения;

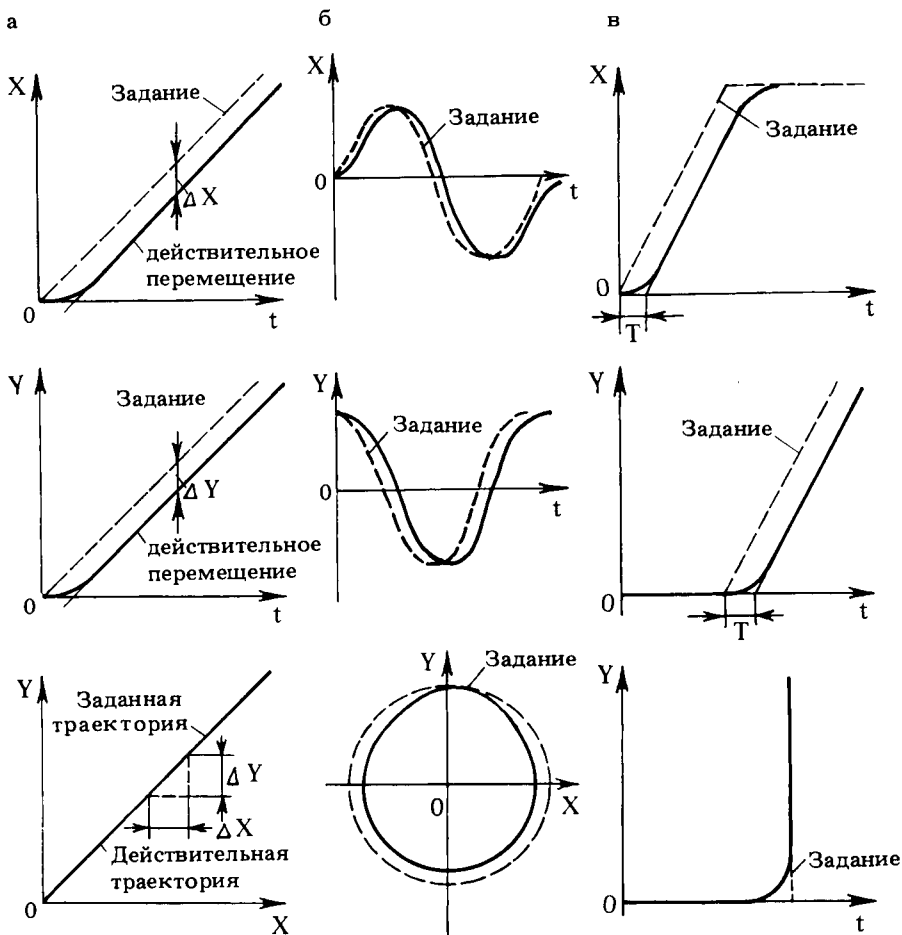


Рис. 9.9. Ошибки двухкоординатной позиционной системы при обработке наклонных (а), окружностей (б) и перемещений под углом 90° (в).

неодинаковыми динамическими характеристиками приводов, нелинейными искажениями при передаче сигналов (например, разностью измеренных значений одной и той же величины перемещения при прямом и обратном ходе датчика положения).

Образующаяся при этом ошибка возникает как суперпозиция ошибок слежения по отдельным координатам. Чем выше скорость и ускорение, тем больше результирующая ошибка слежения.

Скоростная ошибка вычисляется исходя из передаточных свойств всего контура регулирования положения, т.е. с учетом коэффициента усиления контура или добротности системы: $\Delta x \cong \dot{x} / D_{vx}$; $\Delta y \cong \dot{y} / D_{vy}$. Эти выражения справедливы для установившегося режима.

На рис. 9.9 представлены диаграммы обработки траекторий трех раз-

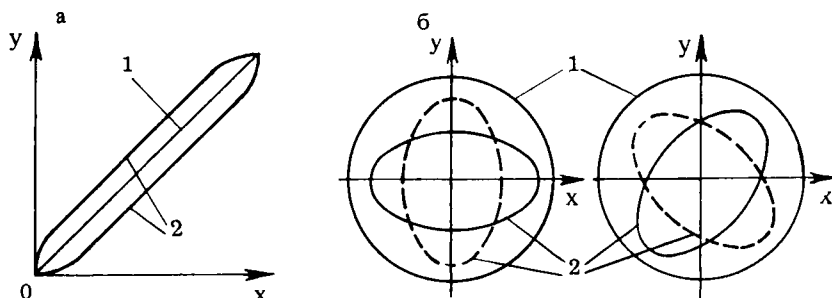


Рис. 9.10. Ошибки двухкоординатной системы, обусловленные различием динамических характеристики координат:

а — обработка наклонной; *б* — то же окружности.

личных видов с целью сравнения появляющейся ошибки. При обработке наклонных ошибка отработки не возникает, если коэффициенты усиления по скорости всех координат равны ($D_{vx} = D_{vy}$). Так как ошибки по положению и координатные скорости в течение обработки остаются постоянными: $\dot{x}/\dot{y} = \Delta x/\Delta y$, то действительная траектория повторяет заданную с временной задержкой. Круговое движение возникает при совершении двумя взаимно перпендикулярными в пространстве координатами синусоидального и косинусоидального движений. Показанное на рис. 9.9 отклонение отработанной окружности от заданной вызвано процессами пуска и торможения при совершении перемещения по координатам X и Y , а также неодинаковыми ошибками по положению, обусловленными изменяющимися координатными скоростями.

При отработке прямоугольного контура с заданной скоростью также возникает ошибка отработки. Ошибка тем выше, чем ниже быстродействие системы привода.

Кроме вызванных свойствами системы ошибок отработки, которые за счет оптимальной настройки регуляторов могут быть уменьшены, но не устранены полностью, появляются ошибки, возникающие вследствие различий в динамике приводов или неверной настройки контуров регулирования положения (рис. 9.10). Если коэффициенты усиления D_{vx} и D_{vy} различны, то при отработке наклонной (несмотря на то что с требуемой точностью достигается конечная точка) возникают контурные ошибки, величина которых зависит от величины разности коэффициентов D_{vx} и D_{vy} .

Сказанное можно отнести к отработке окружностей. Отработанная траектория окружности представляет собой эллипс, диаметр которого расположен вдоль оси с большим коэффициентом усиления. При появлении фазовых расхождений происходит поворот эллипса на плоскости X, Y .

Кроме динамических ошибок, возникающих вследствие передаточных свойств системы регулирования, возможны ошибки, вызванные нелинейными искажениями сигналов. Эти искажения появляются в косвенных измерительных системах и объясняются различием измерения одной и той же величины при прямом и обратном ходе датчика (гистерезис измерительной системы). Они вызываются также зазорами, трением и упругостями механических элементов. Результирующая ошибка соизмерима с ошибкой гистерезиса.

10. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

10.1. СТРУКТУРА И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Согласно теории регулирования, под управлением понимается автоматическая выработка совокупности воздействий, направленных на обеспечение нормального функционирования объекта управления для выполнения им заданной цели управления. Промышленный робот представляет собой сложную систему, состоящую из многозвенного механического манипулятора, исполнительных приводов и собственно системы управления. Исполнительные приводы снабжаются ДОС, регуляторами, усилителями, преобразователями и другими устройствами и бывают пневматические, гидравлические и электрические. Рассмотрим системы управления с электрическими приводами.

Применительно к роботу система управления формирует управляющие воздействия для исполнительных приводов, обеспечивающих отработку схватом манипулятора требуемой траектории с заданными параметрами (ускорением, скоростью, точностью).

В зависимости от структуры системы управления принято различать роботы первого, второго и третьего поколений. Обобщенная функциональная схема системы управления ПР изображена на рис. 10.1. Исходная информация поступает от ЗУ на УВВ, которое передает информацию на устройство анализа информации (УАИ) и на дисплей для осуществления визуального контроля. УАИ осуществляет также обработку информации от ДОС манипулятора и внешней технологической среды.

Можно выделить несколько уровней системы управления. Система управления верхнего уровня решает задачи управления последовательностью операций, требуемых ходом технологического процесса, т.е. обеспечивает реализацию алгоритма управления в технологическом цикле и последовательность циклов.

Система управления нижнего (исполнительного) уровня организует передвижение звеньев манипулятора в определенные позиции, отработку заданных траекторий, удержание схвата, манипулирование инструментом и т.д. При проектировании системы управления этого уровня основное внимание уделяется точности работы и динамическим характеристикам приводов.

Необходимо выделить также систему управления взаимодействием с внешней средой, куда входит сбор информации о состоянии оборудования, датчиков внешней среды и анализ команд оператора и т.д.

Наибольшее распространение в настоящее время получили двухуровневые системы управления с устройствами, работающими по жестким программам. Можно, однако, утверждать, что доля роботов с адаптивным управлением непрерывно увеличивается, особенно в сборочных операциях.

Многообразные системы управления ПР можно классифицировать по различным признакам. Например, по типу исполнительного привода (гидравли-



Рис. 10.1. Обобщенная функциональная схема системы управления роботом.

ческие, пневматические, электромеханические и их комбинации), по виду траектории движения, по типу используемой аппаратуры и т.д. Здесь возможен также подход, который был применен при классификации металлорежущих станков с ЧПУ. Однако в робототехнике принципиально важен способ управления, характеризующийся степенью участия оператора в управлении роботом. По этому признаку можно выделить два больших класса систем (рис. 10.2): 1) человеко-машинные, в которых оператор находится непосредственно в контуре управления; 2) автоматические, в которых оператор участвует в управлении лишь на этапе обучения, исполнение же роботом заданных оператором функций происходит автоматически.

Человеко-машинные системы. в свою очередь различаются по функциям, выполняемым оператором, и подразделяются на системы дистанционного и интерактивного управления (см. рис. 10.2).

При *командном управлении* оператор непосредственно осуществляет управление звеньями манипулятора путем воздействия на командные органы (кнопку, тумблер и т.п.). При *копирующем управлении* манипулятор копирует движения оператора, воздействующего на задающее устройство (движение вверх-вниз, вправо-влево и т.д.), кинематически подобное исполнительному звену робота; движения передаются манипулятору следящей системой (механической, электрической и других типов).

Полуавтоматическое управление заключается в том, что специализированное вычислительное устройство на основе ЭВМ, воспринимая информа-



Рис. 10.2. Классификация систем управления роботами.

цию о движении рукоятки, управляемой оператором, вырабатывает команды, передаваемые органам управления звеньев манипулятора.

Интерактивные системы *супервизорного управления* основаны на том, что оператор, наблюдая на экране за ситуацией в зоне действия робота, подает команды, по которым вступают в действие заранее подготовленные программы автоматического действия робота.

При *диалоговом интерактивном управлении* робот активно участвует в принятии решений.

Системы автоматического управления делятся на следующие виды: 1) системы программного управления, в которых движения робота определены программой, подготовленной и отлаженной заранее, вне технологического процесса. В данном случае имеется полная аналогия с системами ЧПУ станками. Программа составляется с учетом вполне определенного и заранее известного состояния внешней среды. Системы программного управления бывают цикловые, позиционные и контурные (см. главы 2, 8); 2) системы адаптивного управления, в которых движения робота происходят по программе, гибко корректируемой в процессе работы с учетом изменяющихся параметров внешней среды. Такие системы снабжаются различными средствами очувствления; 3) системы интеллектуального управления, которые предусматривают синтез програм-

мы движений робота на основе информации о внешней среде с помощью алгоритма, выполнение которого ведет к решению поставленной задачи.

Очевидно, что ПР, снабженные интеллектуальными системами, обладают наибольшей гибкостью, но в то же время они очень сложные. Поэтому роботы, функционирующие по "жестким" программам, будут еще долгое время оставаться основным средством автоматизации, особенно для монотонных, циклических операций, требующих редких переналадок на новый процесс.

10.2. ЦИКЛОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Цикловые системы управления предусматривают программирование только логической и технологической информации дискретного вида, определяющей последовательность движения звеньев манипулятора. Характерной чертой цикловых систем ПР, как и станков, является наличие датчиков положения того или иного вида. Большинство современных цикловых систем строится на основе электронной элементной базы. Для ряда конкретных применений ПР в условиях пожаро- и взрывоопасного производства оказывается предпочтительным использование пневматических логических элементов и исполнительных устройств. Принципы программирования, функциональный состав цикловых систем управления ПР совпадают полностью с рассмотренными системами для станков.

Для примера рассмотрим специализированное устройство циклового управления ЭЦПУ-6030. Устройство предназначено для манипуляторов, имеющих не более пяти степеней подвижности при наличии одного схвата (или четыре степени подвижности при двух схватах). Таким устройством оснащен широко распространенный ПР МП-9С и некоторые другие модели. Устройство имеет четыре режима работы: 1) перемещение звеньев манипулятора с проверкой точности установки путевых упоров. Таким образом осуществляется программирование информации о положении звеньев манипулятора; 2) установка звеньев манипулятора в исходное положение перед началом отработки программы; 3) программное управление в однократном и циклическом режимах. Ввод программы осуществляется с помощью декадных переключателей; отработка производится по кадрам; 4) программное управление в автоматическом режиме.

Программоноситель выполнен в виде двух наборных полей, содержащих по 30 декадных переключателей. Путем набора определенных комбинаций переключателей формируется управляющая программа. С помощью такого программноносителя обеспечивается программирование одновременного исполнения до двух команд управления звеньями манипулятора, а также технологических команд, команд опроса датчиков, выдержек времени, логических команд и т.д. В устройстве осуществлена реализация алгоритма управления по принципу жесткой логики. В автоматическом режиме работы выбор очередного кадра программы из программноносителя осуществляется по сигналам от счетчика кадров. При этом управляющие команды запоминаются в выходном регистре и хранятся до поступления новых команд. Сигналы на робот, технологическое оборудование и обратно поступают через блоки сопряжения. Команды на технологическое оборудование сохраняются до их исполнения, что

подтверждается датчиками, либо присутствуют в течение определенного времени, что задается блоком программируемых выдержек времени.

Срабатывание счетчика кадров и переход к выполнению очередного кадра программы происходит после получения всех сигналов об исполнении предыдущего кадра. Для повышения надежности работы этого узла устройства служит схема помехозащиты.

Для решения более сложных задач автоматизации требуются более совершенные роботы (с большим числом координат и промежуточных точек позиционирования, с управляемым торможением), управление которыми осуществляется функционально развитыми системами циклового управления. Примерами таких систем являются устройства УЦМ-10, УЦМ-20 и УЦМ-30, обеспечивающие автоматический, полуавтоматический и наладочный режимы работы. Реализация этих устройств осуществлена по принципу микропрограммного автомата, что является более совершенным решением.

Устройство УЦМ-20 предназначено для управления манипуляторами типа "Циклон", "Ритм". Блок управления формирует сигналы управления рабочими органами манипулятора и технологическим оборудованием на основании задания, записанного в кадре программы, и сигналов от датчиков манипулятора и технологического оборудования.

Задание режимов работы устройства (наладочный, шаговый, автоматический однократный, автоматический) обеспечивается с помощью пульта управления, на котором имеется индикация состояния устройств.

В блоке задания программы осуществляется набор кадров рабочей программы и подпрограммы с помощью панели, в гнезда которой устанавливаются диодные штекеры. Блоком задания программы обеспечивается следующая последовательность исполнения команд, содержащихся в каждом кадре программы: команды на позиционирование звеньев манипулятора; команды на зажим-отжим схватов; технологические команды. При позиционировании окончание отработки кадра происходит при поступлении сигнала от датчиков или по истечении определенного времени; команды зажима-отжима схвата подаются в функции времени; окончание отработки технологических команд происходит по сигналам от соответствующих датчиков. Задание временных выдержек производится на плате выдержек времени. Последовательность отработки кадров программы отображается с помощью световой индикации.

Пульт обучения служит для ручного управления звеньями манипулятора и схватами, а также для контроля положения датчиков в режиме обучения робота. Для связи с манипулятором и технологическим оборудованием имеется блок связи.

Модификацией УЦМ-20 является устройство УЦМ-30, снабженное оперативным ЗУ (ОЗУ) большей емкости и кнопочным пультом управления. ОЗУ выполнено энергонезависимым. УЦМ-30 предназначено для управления роботами при автоматизации процессов холодной штамповки в условиях массового и крупносерийного производства.

Устройство УЦМ-663 используется для управления манипуляторами и технологическим оборудованием, имеющим сложные алгоритмы управления, при автоматизации литья, сборки, холодной штамповки в условиях массового и крупносерийного производства. Отметим некоторые особенности УЦМ-663. Требуемые алгоритмы управления задаются с помощью диодной матрицы бло-

ка центрального управления. С целью удовлетворения требований расширения логических возможностей управляющий вычислительный модуль выполнен в виде набора функциональных узлов с общим управлением от центрального блока, который реализован на базе микропрограммного автомата. Программа может задаваться путем обучения или вводиться с командного пульта управления.

Развитая система программирования и возможности гибкой привязки устройства УЦМ-663 к манипуляторам различных типов, вытекающие из особенностей структурно-алгоритмического построения, определили его широкое применение, в особенности при построении локальных РТК со сложными циклограммами работы. Объем памяти составляет 128 слов; в качестве элементной базы применены интегральные схемы типа K155, K511, K519.

ГАП предъявляет новые требования к системам циклового программного управления ПР. Эти требования заключаются в расширении диапазона задач, решаемых РТК, что особенно актуально при автоматизации вспомогательных операций. Существенное расширение функциональных возможностей РТК с цикловыми системами управления может быть достигнуто путем обмена информацией с ЭВМ верхнего уровня. Аппаратная реализация систем управления становится тормозом их дальнейшего развития и совершенства. В настоящее время основным направлением в этом плане является создание унифицированных микропроцессорных структур систем управления ПР, содержащих набор проблемно-ориентированных модулей (см. гл. 2).

Типичным представителем систем нового поколения является блочно-модульное устройство циклового управления УЦМ-100, которое предназначено для управления манипуляторами, работающими в кузнечно-прессовых, литейных, сборочных и других производствах. УЦМ-100 является базовой мо-

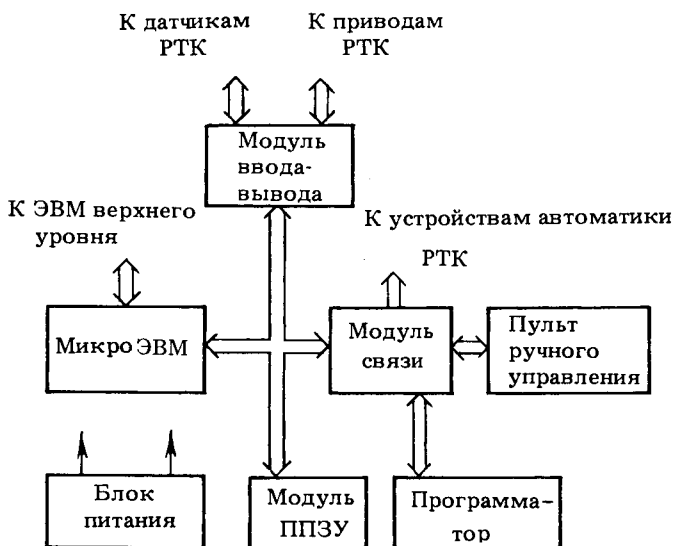


Рис. 10.3. Функциональная схема системы циклового управления УЦМ-100.

делью семейства агрегатно-модульных устройств циклового управления, комплектуется по заказу потребителя и имеет в своем составе ряд конструктивно законченных функциональных устройств: 1) блок управления, осуществляющий реализацию заданных алгоритмов управления; 2) пульт ручного управления; 3) программатор, служащий для ввода и редактирования управляющих программ; 4) блок силового питания привода. Основой блока управления является микропроцессорный комплект КР580.

Устройство работает в автоматическом, полуавтоматическом (покадровом) и наладочном режимах. Приведем основные технические характеристики устройства:

63/96

Интегральное ЗУ (БИС) с электрической перезаписью информации

Вычислитель

На базе микроЭВМ

Метод программирования

Покомандный набор программы на клавиатуре программатора с отображением ее на цифровом табло

Формат кадра

Переменный

Объем программы, команд

1024

Параметры выходных сигналов:

Переменного тока

110 В, до 0,5 А

ПОСТОЯННОГО ТОКА

24 В, до 2 А

Параметры входных сигналов

24 В, не менее 0,01 А

ПОСТОЯННОГО ТОКА

Программируемые выдержки

времени в диапазонах:

0,1–25 c

С дискретностью 0,1 с

1-256 c

С дискретностью 1 с

Габаритные размеры, мм

540 x 435 x 1120

Масса, кг

93 .

10.3. УСТРОЙСТВА ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

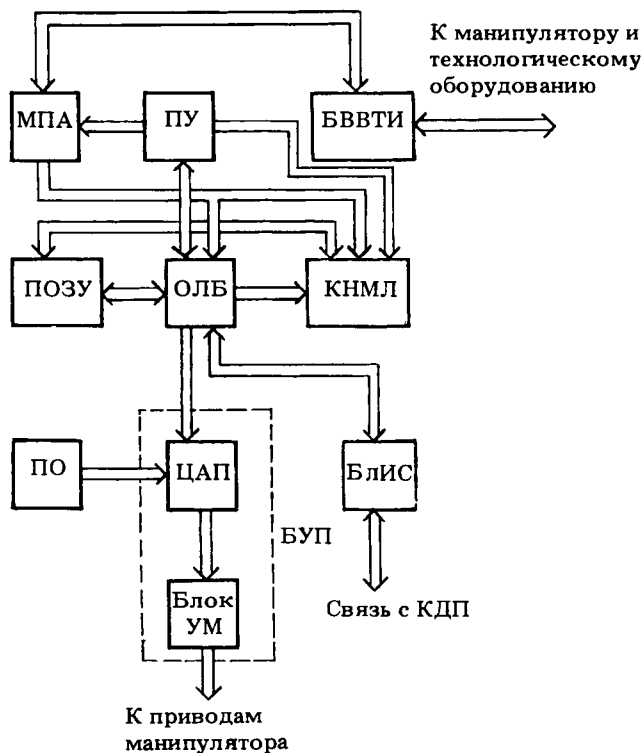


Рис. 10.4. Функциональная схема устройства позиционного управления УПМ-772.

Устройство УПМ-331 обеспечивает управление ПР с шаговым двигателем без обратной связи по положению с частотой питания 0,125–8,0 кГц (двигатели типа ШД-5Д1М-УЗ). Устройства УПМ-552 и УПМ-772 предназначены для управления электроприводами следящего типа с синусно-косинусными вращающимися трансформаторами типа СКТД-6465Д и кодовыми датчиками положения. С пульта управления каждого устройства задаются следующие режимы работы: "программа" (т.е. исполнение программы), "поиск кадра", "ручное управление", "обучение", "контроль программы", "разметка магнитной ленты", "разметка зон", "начальная установка". Для перемещения рабочих органов ПР в режиме обучения служит выносной пульт обучения. Емкость внутренней памяти составляет 100 кадров. Устройства позволяют программировать восемь скоростей перемещения (с разгоном и замедлением).

Рассмотрим функциональную схему устройства УПМ-772 (рис. 10.4), предназначенного для управления промышленными роботами со следящими приводами, имеющими не более семи степеней подвижности (без схвата). Устройство позволяет также реализовать программы загрузки-разгрузки упорядоченной двухкоординатной тары в декартовой системе координат путем введения коррекции по каждой координате. Кроме одинаковых режимов работы, все устройства типа УПМ имеют одинаковые цифровую индикацию номе-

ров зоны и кадра устанавливаемой или обрабатываемой программы, способы световой сигнализации работы устройства, отработки технологических команд и др.

Микропрограммный автомат (МПА) совместно с операционно-логическим блоком (ОЛБ) составляют управляющее вычислительное устройство, которое выполняет функции центрального управления и логической обработки информации. МПА и ОЛБ обеспечивают взаимодействие всех остальных функциональных блоков: блока кассетного накопителя на магнитной ленте (КНМЛ) с объемом хранимой информации 600 К; полупроводникового оперативного запоминающего устройства (ПОЗУ); пульта управления (ПУ); пульта обучения (ПО); блока ввода-вывода технологической информации (БВВТИ), который позволяет принимать 32 входных сигнала и посылать 60 команд на внешнее оборудование; блока управления электроприводами степеней подвижности манипулятора (БУП) (только для УПМ-772 и УПМ-552); блока измерительной системы (БЛИС) (только для УПМ-772 и УПМ-552); блока синхронизации (БС); блока управления скоростью (только для УПМ-331); блока управления шаговым приводом (только для УПМ-331).

Ввод программы осуществляется с помощью пульта обучения и пульта управления по кадрам сначала в ПОЗУ с дальнейшей записью ее на КНМЛ для длительного хранения. Запись программы в КНМЛ реализуется по зонам. Объем зоны соответствует объему памяти ПОЗУ. Это позволяет считывать в КНМЛ и записывать в ПОЗУ программную информацию блоками кадров, содержащихся в одной зоне КНМЛ.

Режим "начальная установка" применяется для приведения узлов схемы и манипулятора в исходное состояние.

В режиме "разметка магнитной ленты" производится контроль качества ленты и разбивки ее на рабочие зоны. В режиме "разметка зоны" осуществляется разделение зон МЛ на кадры с маркировкой номеров зон и кадров внутри каждой зоны. Оператор управляет перемещением звеньев манипулятора с ПУ в режиме "ручное управление". Ввод оператором программной информации с ПО и ПУ в ПОЗУ по кадрам производится в режиме "обучение". После записи информации в ПОЗУ она может быть переписана в КНМЛ для длительного хранения. Для контроля правильности набора и отработки программы в автоматическом режиме по кадрам и программы в целом служит режим "контроль программы", при этом скорость движения звеньев манипулятора вдвое ниже, чем в режиме "программа". Основным рабочим режимом устройства является режим "программа", в котором производится отработка программы в автоматическом режиме с заданной скоростью с любого номера кадра, заданного оператором. В режиме "поиск кадра" находят требуемую зону и кадр, в который необходимо записать (считать) программную информацию или начать ее отработку, при этом номера зоны и кадра отображаются на цифровых индикаторах ПУ.

От кодовых датчиков положения (КДП) поступают сигналы о фактическом положении звеньев манипулятора. Эта информация преобразуется в блоке измерительной системы (БЛИС) в цифровую форму (с помощью преобразователей "фаза—код") и поступает в ОЛБ. Последний является устройством, где происходит сравнение программных заданных и текущих значений коор-

динат. Результат сравнения поступает в БУП в цифровом коде, где с помощью ЦАП преобразуется в управляющие воздействия постоянного тока, изменяющиеся в пределах от -10 до $+10$ В. Проходя через усилители мощности (УМ), они подаются к электроприводам манипулятора.

Выдача команд на технологическое оборудование, управление схватом (включено—выключено), а также прием сигналов от оборудования производится блоком ввода-вывода технологической информации (БВВТИ). Здесь же имеется узел задания временных выдержек времени с диапазоном $0-30$ с.

10.4. УСТРОЙСТВА КОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Устройства контурного управления типа УКМ предназначены для управления манипуляторами, рабочие органы которых перемещаются по сложным пространственным траекториям. УКМ-552 применяются при автоматизации технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий на поверхности неподвижных или движущихся с помощью конвейера изделий сложной пространственной конфигурации при мелкосерийном производстве. УКМ-772 используется при автоматизации процессов дуговой сварки, а также для автоматизации загрузочно-разгрузочных операций, сборки, контактно-точечной сварки, штабелирования и т.д.

Системы позиционного управления УПМ-331, УПМ-552, УПМ-772, рассмотренные в § 10.3, построены на основе микропрограммного автомата с конечным числом состояний (не более 256), что вполне достаточно для решения многих задач автоматизации. В них используется так называемая жесткая система, при которой логическая связь основных модулей оборудования и реализация алгоритма управления выполнены преимущественно аппаратным способом. Однако неуклонное расширение задач управления, их специфика, зависящая от характера объектов автоматизации, необходимость удовлетворения требованиям гибкого производства, с одной стороны, совершенствование средств вычислительной техники и БИС, повышение уровня их надежности, с другой, предопределяют использование "мягких" принципов управления, когда разнообразие функций управления достигается изменением программного (математического) обеспечения без изменения аппаратного состава. Такие системы, построенные по блочно-модульному принципу, демонстрируют высокую совместимость, обеспечивают построение различных модификаций систем, удобную связь с устройствами управления верхнего уровня.

Устройства УКМ-552 и УКМ-772 построены на базе микроЭВМ "Электроника 60" и унифицированы по структурно-алгоритмическому и конструктивному признакам. Обобщенная функциональная схема устройств типа УКМ приведена на рис. 10.5.

Отработка программы осуществляется микроЭВМ, которая с помощью логических блоков формирует и выдает управляющие сигналы на приводы манипулятора и технологическое оборудование. Обмен информацией между модулями устройства, внешними объектами и процессором ЭВМ осуществляется через внутреннюю магистраль устройства и канал ЭВМ, которые сопряжены шинным формирователем и адаптером.

Комплекс отладочных средств математического обеспечения (КМО) обеспечивает диагностику устройства и его отдельных модулей и осуществляет

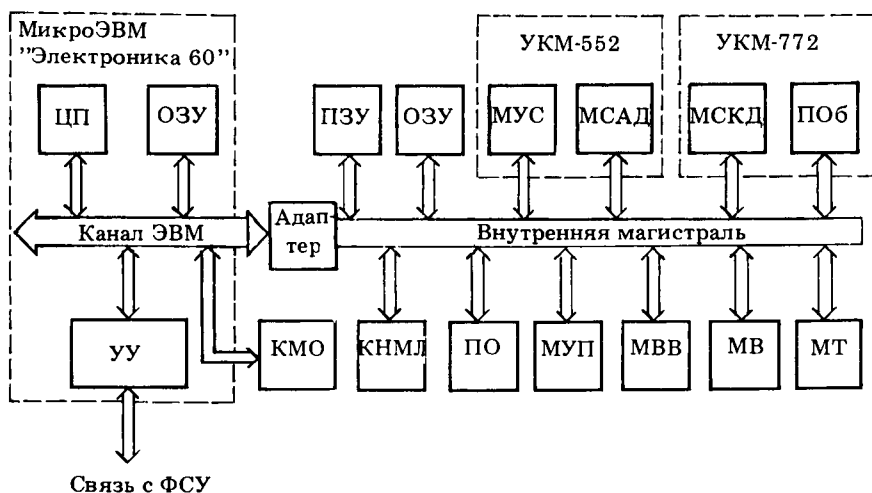


Рис. 10.5. Обобщенная функциональная схема устройства контурного управления типа УКМ.

требуемые функции управления как в позиционном, так и в контурном режимах. Модули ввода, вывода и таймера (МВВ, МВ, МТ) выполняют синхронизацию работы модулей устройства и их сопряжение с оборудованием и манипулятором. МВВ и МВ снабжены элементами гальванической развязки. МУП управляет приводами манипулятора и в своем составе имеет ЦАП и АЦП. Устройство УКМ-552 (см. рис. 10.5) снабжено потенциометрическими датчиками обратной связи типа СПЧ-8. Их сопряжение с общей магистралью производит модуль связи с аналоговыми датчиками (МСАД). В этой системе имеется также модуль управления скоростью МУС. Устройство УКМ-772 снабжено кодовыми датчиками типа ДПК-1М или ФЭП-15, их сопряжение осуществляет модуль МСКД. Пульт обучения (ПОБ) используется для ручного управления перемещением рабочих органов манипулятора, записи в ОЗУ программируемой информации по кадрам и световой индикации вводимой информации. Пульт оператора (ПО) обеспечивает задание режимов работы устройства, индикацию его состояния в виде буквенной, цифровой и специальной знаковой информации. Приведем основные технические данные устройства УКМ-772:

Тип системы	Контурная, цифровая, с линейным интерполятором
Точность	Не ниже одной дискреты
Число программно и одновременно управляемых координат	7
Система отсчета	Абсолютная
Число двоичных разрядов для обработки информации	15
Программоноситель	КНМЛ "Искра 005-33"
Объем памяти	75 К байт
ОЗУ	Полупроводниковое
Объем ОЗУ	28 К (2 модуля ПЗ)

Отработка программы	По кадрам с возможностью блокировки технологических команд и процесса
Число команд обмена с манипулятором и технологическим оборудованием	48
Элементная база	ЭВМ "Электроника 60М", интегральные и дискретные компоненты
ДОС с манипулятором	Кодовые ДПК-1М или ФЭП-15
Тип привода	Следящий электрогидравлический
Индикация	Буквенно-цифровая
Питание	От сети трехфазного тока 380 В; 50 Гц
Потребляемая мощность, кВА	Не более 1
Габаритные размеры, мм	730 × 610 × 1700
Масса, кг	Не более 250
Средний срок службы, лет	10

Модульное устройство позиционно-контурного управления типа УПКМ представляет собой ряд унифицированных средств позиционно-контурного управления манипуляторами для автоматизации разнообразных основных и вспомогательных технологических операций в составе РТК. Его основой, как и в предыдущих системах, является микроЭВМ "Электроника 60". Сочетанием набора функциональных модулей аппаратуры и программного обеспечения создаются конкретные модификации (УПКМ-01, УПКМ-02). Приведем некоторые их отличительные особенности: кроме КНМЛ, можно использовать накопитель на гибких магнитных дисках (НГМД); система приспособлена для работы с датчиками различных типов (фотоэлектрическими, фазовыми, потенциометрическими); расширено число команд обмена с манипулятором и технологическим оборудованием (до 128).

10.5. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ

Для универсального ПР РМ-01 применяется микропроцессорная система управления "СФЕРА-36". ПР РМ-01 предназначен для выполнения многообразных операций — сборки, монтажа, сортировки, упаковки, погрузки-разгрузки, дуговой сварки и т.д. Манипулятор робота имеет шесть степеней подвижности; звенья манипулятора соединяются друг с другом с помощью суставов, напоминающих локтевой или плечевой сустав человека.

Общий вид манипулятора, направления осей вращения и осей координат показаны на рис. 10.6. Каждое звено манипулятора приводится во вращение индивидуальным электродвигателем постоянного тока через редуктор. Электродвигатели оборудованы электромагнитными тормозами, которые позволяют надежно затормозить звенья манипулятора при отключении питания. Этим обеспечивается безопасность обслуживания робота, а также возможность перемещения его звеньев вручную. Системы координат робота приведены на рис. 10.6. Базовая система координат (WORLD) имеет три взаимно перпендикулярные оси X , Y , Z с началом координат, расположенным на оси симметрии плеча манипулятора. При движении суставов манипулятора базовая система координат неподвижна. Инструментальная система координат

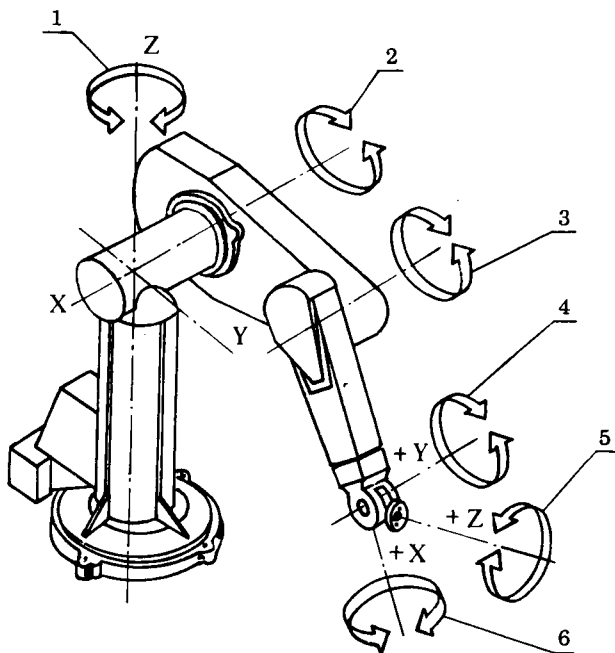


Рис. 10.6. Суставы манипулятора:

1 – талия (сустав 1), угол поворота 320° ; 2 – плечо (сустав 2), угол поворота 250° ; 3 – локоть (сустав 3), угол поворота 270° ; 4 – кисть (сустав 5), угол поворота 200° ; 5 – кисть (сустав 6), угол поворота 530° ; 6 – кисть (сустав 4), угол поворота 300° .

(TOOL) прикреплена к монтажному фланцу кисти и перемещается вместе с ним. Робот имеет позиционно-контурную систему управления. Его номинальная грузоподъемность 2,3 кг при максимальной скорости перемещения до 0,5 м/с и максимальной абсолютной погрешности позиционирования $\pm 0,1$ мм. Манипулятор обслуживает рабочую зону в виде сферы радиусом 864 мм с вращением вокруг колонны (степень 1) на 320° и вокруг плеча (степень 2) на 250° . Связь с внешним оборудованием производится по 32 каналам (вход-выход). Емкость ОЗУ составляет 12 К слов. Связь с внешней ЭВМ осуществляется последовательным каналом. ВЗУ типа НГМД имеет емкость 65 К байт.

Микропроцессорная система управления "СФЕРА-36" построена по иерархическому принципу (рис. 10.7) и содержит два уровня управления: верхний и нижний. На верхнем уровне решаются следующие задачи: 1) расчет алгоритмов планирования траектории движения схвата манипулятора и подготовка программ движения каждого его звена; 2) логическая обработка информации о состоянии устройств, входящих в состав робототехнического комплекса, и согласование работы робота в составе РТК; 3) обмен информацией с ЭВМ более высокого уровня; 4) диалоговый режим работы оператора с помощью видеотерминального устройства (ВТУ); 5) чтение-запись, долговременное хранение программ пользователя с помощью НГМД; 6) ручной режим управле-

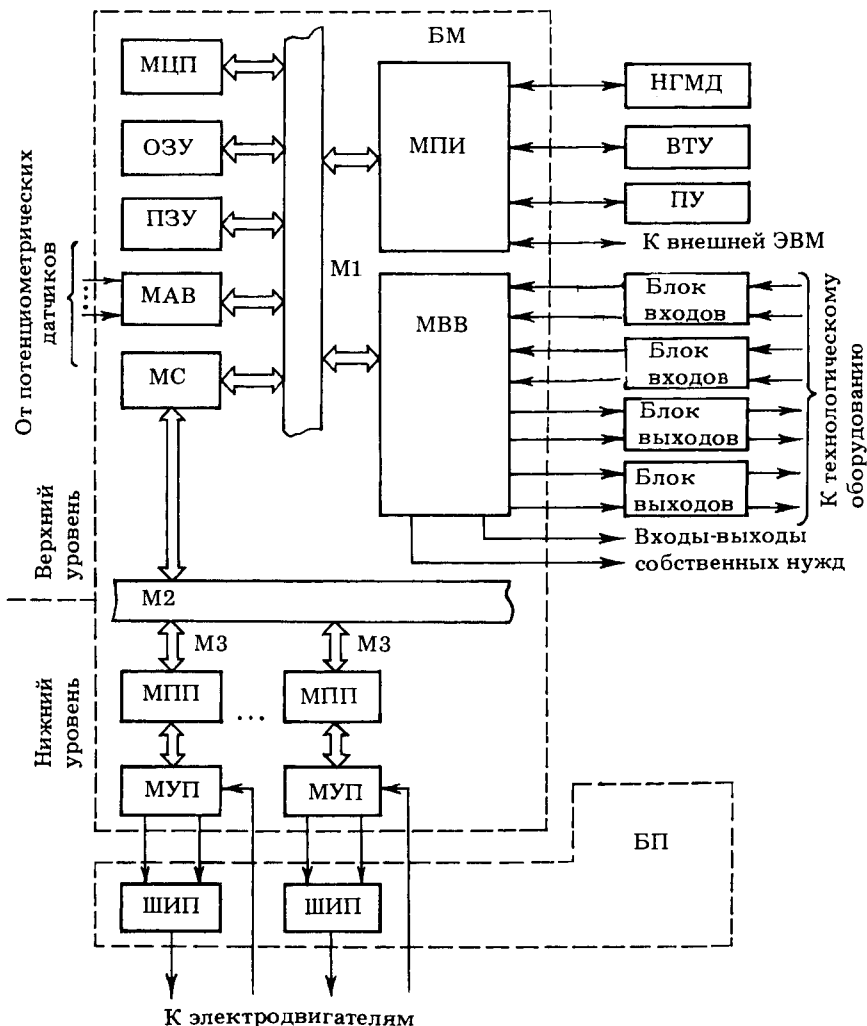


Рис. 10.7. Функциональная схема системы управления универсального промышленного робота.

ния манипулятором с помощью пульта ручного управления; 7) диагностика работы системы управления; 8) калибровка местоположения звеньев манипулятора.

На нижнем уровне управления решаются задачи отработки звеньями манипулятора заданных движений, которые формируются на верхнем уровне. Обработка программируемых положений производится при заданных параметрах (скорости, ускорении) с помощью цифровых электромеханических модулей, приводящих в движение звенья манипулятора.

Система управления верхнего уровня (см. рис. 10.7) состоит из следую-

щих устройств: модуля центрального процессора (МЦП); ОЗУ; ПЗУ; модуля аналогового ввода (МAB), куда подаются сигналы от потенциометрических датчиков грубого отсчета положения; модуля последовательного интерфейса (МПИ); модуля ввода-вывода (МВВ); модуля связи (МС). Обмен информацией между модулями верхнего уровня производится с помощью системной магистрали М1.

Нижний уровень управления содержит: модули процессора привода (МПП); модули управления приводом (МУП). Число модулей МПП и МУП соответствует числу звеньев манипулятора и равно 6. МПП соединяются с модулем связи с помощью системных магистралей М2 и М3. Управление двигателями постоянного тока электроприводов звеньев манипулятора производится с помощью транзисторных широтно-импульсных преобразователей (ШИП), входящих в состав блока питания (БП).

МЦП выполнен на базе микропроцессора К1801 и содержит: однокристалльный процессор; регистр начального запуска; системное ОЗУ емкостью 32 16-разрядных слова; системное ПЗУ емкостью 2 К 16-разрядных слов; резидентное ПЗУ емкостью 4 К 16-разрядных слов; программируемый таймер. МЦП организует обмен информацией при помощи системной магистрали М1, функционально организованной одноканальным процессором К1801ВМ1. Система команд магистрали совместима с системой команд микроЭВМ "Электроника 60".

Быстродействие МЦП характеризуется следующими данными: 1) "сложение" при регистровом методе адресации — 2,0 мкс; 2) "сложение" при косвенно-регистровом методе адресации — 5,0 мкс; 3) умножение с фиксированной запятой — 65 мкс.

Пуск центрального процессора производится автоматически при включении блока питания системы управления. В счетчик команд автоматически загружается адрес первой команды 160000₈, а в слово состояния процессора загружается константа 340₈.

Системное ОЗУ объемом 32 16-разрядных слова, которые располагаются в зоне 177600₈—177676₈, служит для временного хранения операндов и векторов текущего процесса при выполнении системной программы.

Долговременное хранение системной программы начального запуска и пультowych режимов производится в ПЗУ объемом 2 К 16-разрядных слов. Адреса ПЗУ могут быть использованы оператором в отличие от адресов ОЗУ, которые зарезервированы для нужд системы.

Вычислительным и управляющим узлом нижнего уровня является МПП, который построен на основе микропроцессора К1801 и включает однокристалльный микропроцессор; ОЗУ емкостью 1 К 16-разрядных слов; ППЗУ емкостью 4 К слов с ультрафиолетовым стиранием.

Функциональная схема электропривода одного звена манипулятора изображена на рис. 10.8. В МУП обрабатывается информация, поступающая из МПП, и вырабатываются сигналы управления преобразователем "код — ширина импульсов" (ПКШИ) через регистр управления (РУ).

ПКШИ вырабатывает сигналы по четырем каналам для управления транзисторными ключами ТК1—ТК4 ШИП, питающего двигатель постоянного тока (ДПТ). Помимо этого, в МУП производится первичная обработка сигналов фотоэлектрического датчика (ФИД), который вырабатывает две последова-

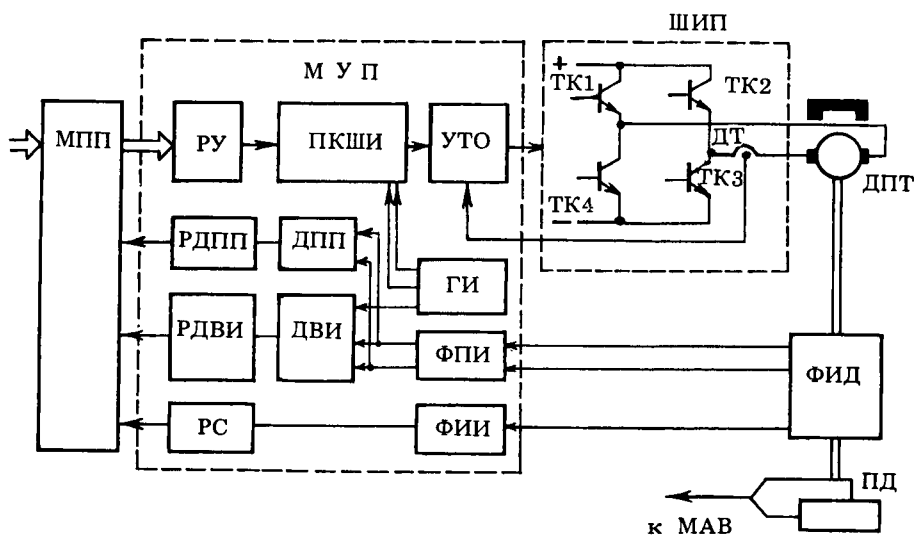


Рис. 10.8. Функциональная схема следящего электропривода одного звена манипулятора.

тельности сигналов, смещенные относительно друг друга на ± 90 электрических градусов в зависимости от направления движения. Этой цели служат формирователь позиционных импульсов (ФПИ), датчики временного интервала (ДВИ) и приращения позиции (ДПП), которые соединяются с МПП через соответствующие регистры (РДВИ и РДПП). В формирователе индексных импульсов (ФПИ), формируемых по принципу "один импульс за один оборот датчика", обрабатывается сигнал ФИД по каналу INDEX, ФПИ и МПП соединены через регистр счета (РС). Благодаря схемным решениям МУП обеспечивает повышение разрешающей способности ФИД в четыре раза.

Синхронизация блоков схемы осуществляется генератором импульсов (ГИ). Ограничение тока якоря ДПТ в переходных режимах, а также в случае перегрузки звена манипулятора производится устройством токоограничения (УТО), включенным на входе ШИП. Контроль величины тока осуществляется датчиком тока (ДТ). Для грубого отсчета положения звена манипулятора применяется потенциометрический датчик (ПД), сигнал которого подается на МАВ (см. рис. 10.7).

11. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ОТ ЭВМ

11.1. МАТЕРИАЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

РТК создаются с целью наиболее экономичного обеспечения общества необходимым количеством продукции определенного вида. Эта задача может быть решена путем модернизации существующего или организации вновь создаваемого производства. В обоих случаях используются существующее технологическое оборудование и имеющиеся типы промышленных роботов или создаются новые специальные виды оборудования и роботов. Кроме того, применение РТК может потребовать изменения существующей (традиционной) компоновки, т.е. взаимного расположения элементов основного и вспомогательного оборудования.

РТК различаются по виду технологического оборудования, обслуживающего различные технологические процессы. При этом для автоматизации различных процессов могут применяться одинаковые универсальные ПР. Однако в ряде случаев оказывается целесообразным применение специализированных ПР, разработанных специально для работы с данным оборудованием.

Характер технологического процесса и технические данные оборудования существенно влияют на выбор рациональной конструкции, требования к программному обеспечению и выбор алгоритмов управления ПР.

Системы управления РТК делятся на централизованные, децентрализованные (автономные) и комбинированные. *Централизованное управление* осуществляется от стандартной ЭВМ или специальными устройствами группового управления. Недостатком этого вида управления является большой объем обмена информацией между управляющей стороной и объектом управления. Но при централизованном управлении обеспечивается оптимизация работы РТК по общему критерию оптимальности.

Децентрализованное управление реализуется местными устройствами управления, работа которых координируется простейшими устройствами связи по времени начала и конца отдельных операций и по сигналам различных параметров. Децентрализованное управление требует минимального обмена информацией. Недостатком такого управления является сложность осуществления оптимизации работы РТК по общему критерию оптимальности.

Комбинированное управление осуществляется одновременно с центрального пункта (ЭВМ) и от местных устройств управления. Комбинированное управление чаще всего является иерархическим (многоуровневым). При этом местные устройства управления образуют низший уровень иерархии, подчиненный управляющему центру РТК, являющемуся элементом более высокого уровня. С увеличением сложности РТК возрастает и количество уровней иерархической системы управления.

В процессе функционирования РТК независимо от его конструкции и назначения возникает материальный поток $\Phi_{\text{м}}$, определяемый технологическим процессом комплекса. Этот поток складывается из основного потока ($\Phi_{\text{осн}}$) исходного материала (сырья, заготовок и т.д.), преобразуемого технологическим оборудованием РТК в некоторый готовый продукт (изделие), потока вспомогательных материалов и отходов $\Phi_{\text{всп}}$, потока инструмента и приспособлений $\Phi_{\text{и.пр}}$ и потока энергии $\Phi_{\text{э}}$:

$$\Phi_{\text{м}} = \Phi_{\text{осн}} + \Phi_{\text{всп}} + \Phi_{\text{и.пр}} + \Phi_{\text{э}}.$$

При нормальной работе РТК все составляющие материального потока должны представлять собой заданные непрерывные или дискретные функции времени, реализуемые с помощью исполнительных органов технологического оборудования, транспортных устройств и промышленных роботов.

Для управления материальными потоками создаются потоки информации. Используемую в РТК информацию можно разделить на априорную и текущую. *Априорная информация* — это информация, полученная до начала функционирования РТК (сведения о закономерностях, используемых для реализации технологического процесса, результаты расчетов, выполняемых при проектировании РТК, конструктивные параметры оборудования и системы управления, алгоритмы и программы работы комплекса и его элементов).

Текущая информация отражает состояние РТК, наличие возмущающих и управляющих воздействий. Источниками текущей информации являются различные датчики и сенсорные устройства, а также контроллеры, пульта управления и другие устройства связи с человеком-оператором. Частным случаем текущей информации является накапливаемая информация, позволяющая производить операции с массивами данных, получать графики изменения различных координат системы, осуществлять статистическую обработку сигналов текущей информации и оптимизацию управления по интегральным критериям качества.

Все части РТК объединяются общей системой автоматического управления. Для РТК средней сложности применяют трехуровневую иерархическую систему управления.

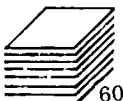
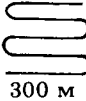
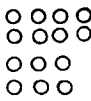
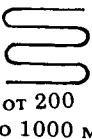
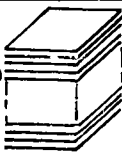
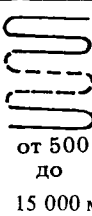
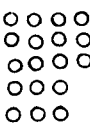
Первый уровень образуют системы управления отдельными технологическими ячейками, которые выполняются на основе специальных устройств управления конкретным оборудованием и микроЭВМ. *Второй уровень* связывает отдельные элементы (технологическое оборудование, транспортные устройства и промышленные роботы) в единый, согласованно работающий комплекс. На этом уровне управление осуществляется с помощью стандартных микро- и мини-ЭВМ. При этом производится координация работы составных частей РТК, контроль технологических режимов и исправности оборудования, синтез управляющих программ для первого уровня, обработка и передача информации между частями РТК, а также обмен информацией с третьим уровнем управления. *Третий уровень* представляет собой уровень оперативно-календарного планирования и контроля. Управление на данном уровне производится на основе мини-ЭВМ.

11.2. СИСТЕМЫ С ПРЯМЫМ ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

11.2.1. Типовая структура системы DNC

Целесообразность применения систем DNC очевидна при изготовлении деталей мелкими и средними сериями, так как именно здесь сказывается эффективность быстрой переналадки, осуществляемой без больших затрат времени. Как известно, общее время обработки на станках состоит из машинного и

Таблица 11.1

Область применения систем ЧПУ	Объем информации			Ручные	Носитель информации:	Изготовление программы:
	символы	машинописные страницы	длина перфоленты		перфолента (ПЛ), магнитная лента (МЛ)	вручную (Р), машиной (М)
Сверление, гочение, фрезерование, сверление печатных плат	800	 4	от 10 до 20 м	○	ПЛ	Р, М
	80000	 40	 200 м	○	ПЛ	М
Разводка печатных плат	120000	 60	 300 м	○	ПЛ	М
Проверка монтажа печатных плат	2400000	 1200 от 40 до 200	 до 6000 м		ПЛ, МЛ	М
Вычерчивание оригиналов печатных плат	от 80000 до 400000		 от 200 до 1000 м	○ ○	ПЛ	Р
Вычерчивание масок интегральных микросхем	от 200000 до 6000000	 от 100 до 3000	 от 500 до 15 000 м		МЛ	М

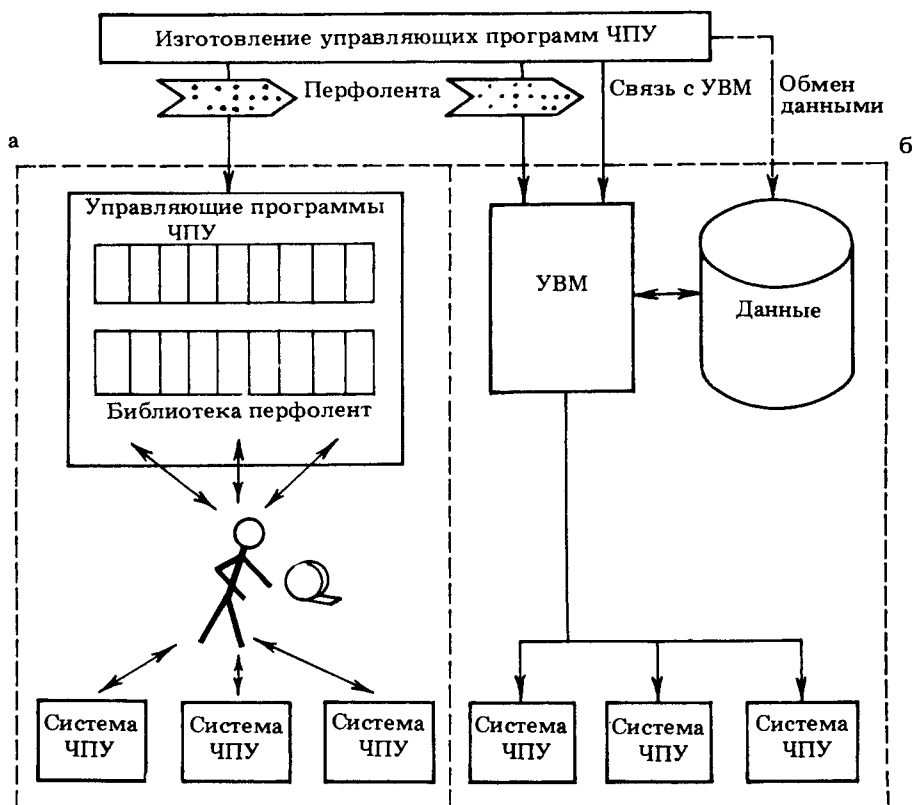


Рис. 11.1. Поток информации при управлении технологическим процессом с помощью традиционных систем ЧПУ (а) и системы DNC (б).

вспомогательного. Частая смена вида обрабатываемых изделий приводит к повышению доли вспомогательного времени, которое затрачивается на подготовку, распределение и ввод информации, например, с перфоленты; в целом это отрицательно сказывается на использовании станка. Объем информации, хранящейся на различных носителях, быстро растет, особенно это касается таких производств, как сверление печатных плат или контроль электрических соединений печатных плат. В этом случае хранение программ, записанных на перфоленте, их распределение между станками и считывание не может быть выполнено вручную. Здесь на помощь приходят системы прямого цифрового управления (DNC) (табл. 11.1).

В системе DNC с целью непосредственного управления станками с ЧПУ управляющая вычислительная машина (УВМ) принимает и распределяет потоки информации по станкам. Таким образом, поток информации минует считывающее устройство, которое, как отмечалось, является одним из главных источников ошибок. Применение системы DNC позволяет осуществить: централизованное управление банком данных для станков с ЧПУ и автоматизацию распределения управляющей информации, которая до этого накаплива-

лась на перфоленте (рис. 11.1).

В традиционных системах ЧПУ перфоленты хранятся централизованно в библиотеке программ и распределяются по потребностям. В системе DNC информация складывается в банке данных, например на магнитных дисках, и по потребности распределяется по станкам с ЧПУ с помощью УВМ. В этом случае не исключается также изготовление перфоленты с целью ее применения непосредственно в станке с ЧПУ.

11.2.2. Функции системы DNC

Как отмечалось, наиболее важным признаком системы DNC является хранение программ в одном из видов запоминающих устройств и их распределение по запросам станков с ЧПУ. На рис. 11.2 дана функциональная схема системы DNC, в которой управляющие программы распределяются между системами управления станков через общий канал связи. В системе DNC могут использоваться следующие виды систем ЧПУ: УВМ — системы NC с перфолентой — станки, УВМ — системы NC с магнитной лентой — станки, УВМ — системы NC с промежуточной памятью — станки, УВМ — системы CNC — станки.

Независимо от варианта управления в системе DNC следует различать ее основные и дополнительные функции. К основным функциям системы DNC относятся хранение программ ЧПУ и их распределение по запросам систем управления станками с помощью УВМ. В этом смысле использование УВМ как банка данных более удобно, чем пользование библиотекой перфолент. После формирования программ они могут быть тиражированы на различных носителях, например на перфолентах, перфокартах, магнитных дисках, и представлены в различных форматах и кодах (EIA, ISO). УВМ является также весьма надежным и удобным хранилищем программ и обеспечивает к ним быстрый автоматический доступ. После поступления запроса на программу УВМ сначала производит перегрузку программы в буферное устройство и осуществляет ее контроль. При отсутствии ошибки программа передается для управления станком. Вид передачи (блоками, кадрами или символами) зависит от аппаратной реализации системы. Заполнение буфера в центральной памяти из внешнего ЗУ производится с помощью соответствующего программного обеспечения. Очередной канал доступа к центральной памяти открывается после окончания передачи программы к станку.

В зависимости от требований технологического процесса целесообразно включать в программное обеспечение дополнительные функции системы DNC, что повышает возможность комплексного управления процессом, т.е. увеличивает экономическую эффективность системы. Большую гибкость всей системе придает возможность корректировки управляющих программ с помощью УВМ по запросу через терминал пользователя, находящийся на станке. УВМ осуществляет также подготовку управляющих программ. Исходной является программа, написанная на одном из языков высокого уровня (АРТ, EXART). В число основных функций УВМ входит редактирование и контроль программы, в число дополнительных — переработка информации о ходе технологического процесса, получаемой с помощью различных датчиков, с целью его контроля, а в отдельных случаях и активного вмешательства.

На УВМ возлагается функция управления материальным потоком, под

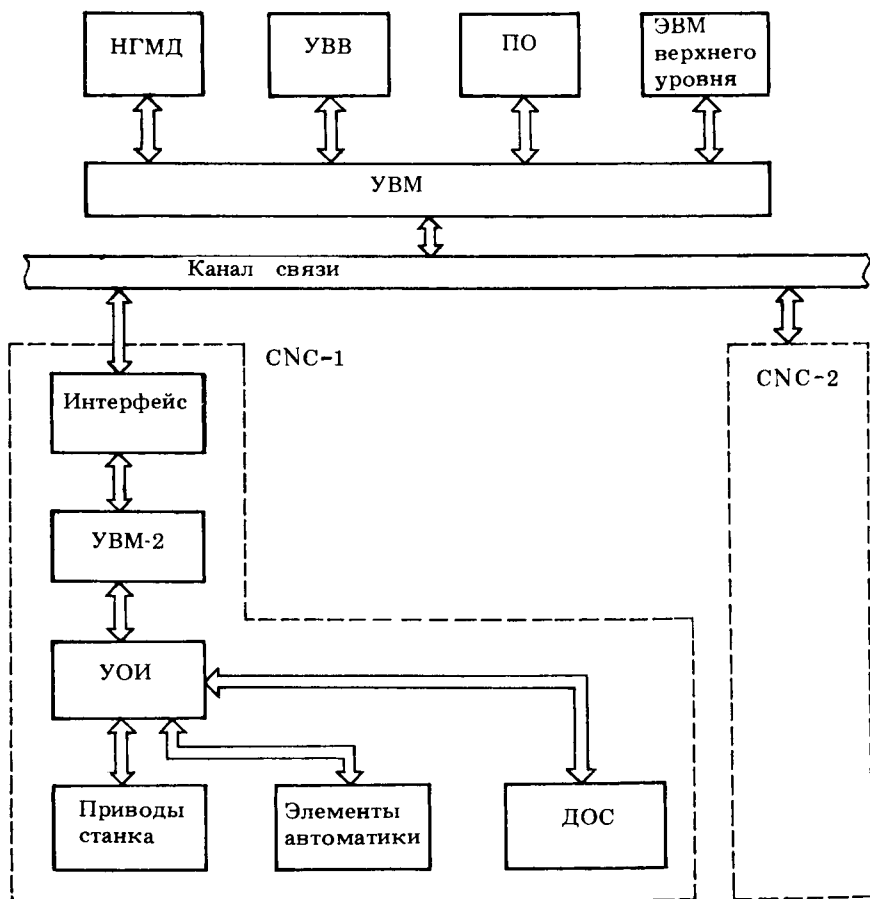


Рис. 11.2. Структура системы DNC:

НГМД – накопитель на магнитных дисках; УВВ – устройство ввода-вывода; ПО – пульт оператора; УОИ – устройство обмена информацией; ДОС – датчики обратной связи со станком.

которым понимается процесс складирования и транспортировки, загрузки и разгрузки складов и рабочих мест. Эта информация используется для корректировки рабочих планов.

11.2.3. Информационные потоки в системе DNC

Потоки информации, касающиеся распределения данных в ЧПУ, представлены на рис. 11.3. Данные для управления системой ЧПУ передаются побочно из внешнего запоминающего устройства (ВЗУ) в предварительно зарезервированные области центральной памяти УВМ. Эти области называются буферными ЗУ. При поступлении сигнала-запроса от станка информация из буферного ЗУ передается к нему. Такая организация промежуточной памяти необходима по

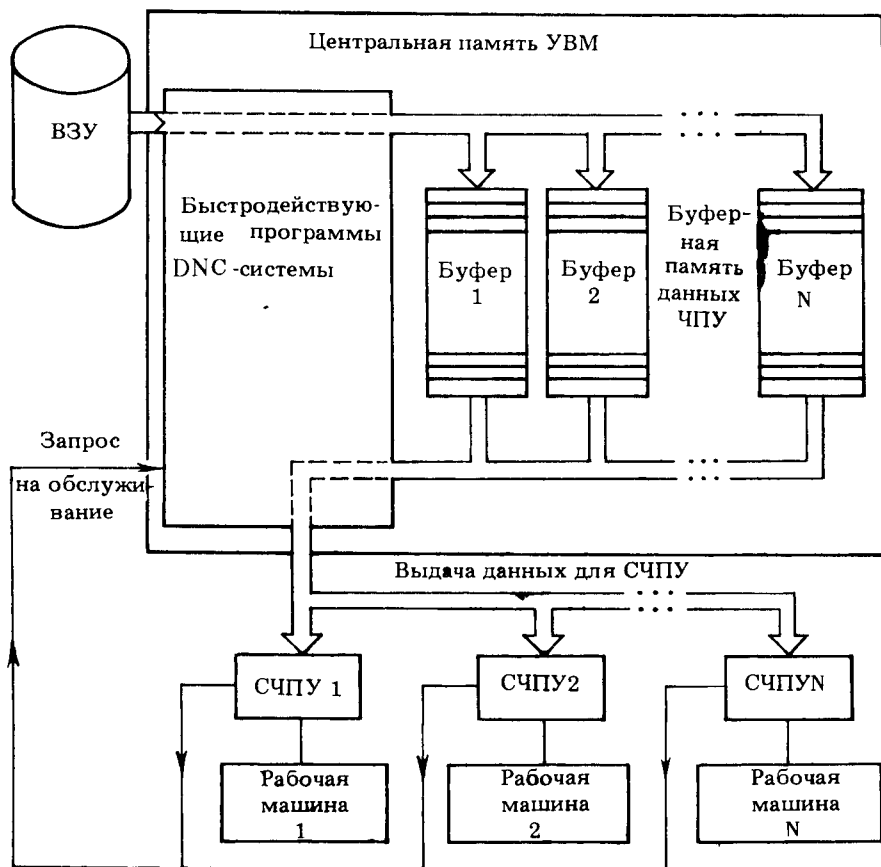


Рис. 11.3. Информационные потоки в системе DNC.

той причине, что доступ к ВЗУ связан с большими потерями времени, а это делает невозможным управление процессом в реальном времени. По окончании обработки данных буфера в него снова вводятся данные из ВЗУ.

При комбинированном способе передачи данных системе ЧПУ из одной области буфера происходит одновременно с записью информации из ВЗУ в другую область буфера. Этим гарантируется высокое быстродействие процесса, диктуемого станком.

Рассмотрим процесс передачи управляющей программы в системе, алгоритм которого приведен на рис. 11.4. При запросе кадры программы пересылаются из ВЗУ в буферную память, и системе ЧПУ выдается сигнал готовности. После начала работы происходит покадровая передача программы из буферной памяти в систему ЧПУ. Окончание передачи программы индицируется на пульте. Затем происходит проверка использования данных буфера и его повторное заполнение из ВЗУ.

Мощность всей системы DNC во многом зависит от канала связи, что особенно важно для пространственно-распределенных объектов. По причине боль-

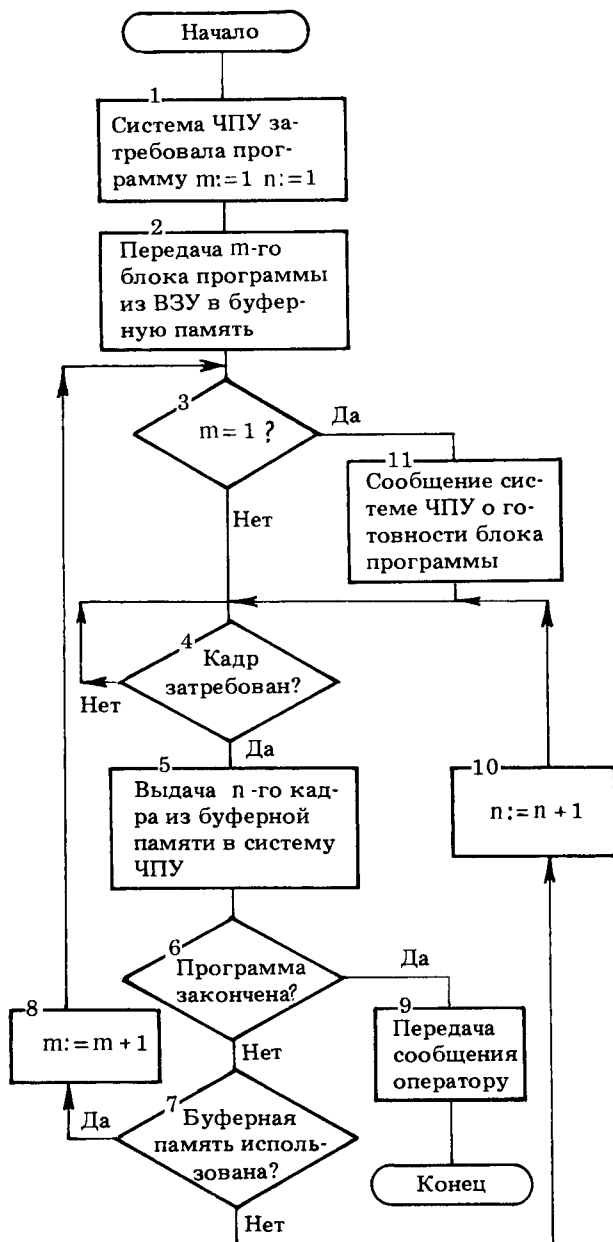


Рис. 11.4. Алгоритм передачи управляющих программ в системе DNC: m – номер зоны буферной памяти; n – номер кадра программы ЧПУ.

ших капитальных затрат системы DNC, как правило, создаются последовательно, поэтому канал связи должен иметь возможность наращивания и соединения с другими каналами при минимальных затратах. Эти требования выполняются при создании систем DNC по модульному принципу и единым стандартам. В зарубежной практике нашли применение унифицированные каналы связи CAMAC, PDV. Например, CAMAC имеет последовательно-кольцевую структуру канала связи стандартного исполнения.

11.2.4. Программное и аппаратное обеспечение системы DNC

Описанные основные и дополнительные функции системы DNC реализуются в УВМ посредством проблемно-ориентированного программного обеспечения. Объем центральной памяти может наращиваться до определенных пределов, поэтому ПО распределяется между центральной и внешней памятью. При этом различают резидентные программы и функции центральной памяти, а также программы, поступающие из ВЗУ по требованию во временную область центральной памяти, резервируемую УВМ. Все программы, которые используются очень часто или которые должны немедленно реагировать на запрос станка, должны быть в каждый момент времени готовы к выполнению. К ним относятся программы обработки запросов, программы загрузки буферной памяти и программы выдачи управляющей информации к станку.

В ВЗУ хранятся программы: загрузки управляющих программ систем ЧПУ; обслуживания; корректировки управляющих программ ЧПУ; сбора технологической информации; управления материальными потоками; дополнительных функций управления технологическим процессом; обмена информацией.

В центральной памяти УВМ хранятся программы: обработки прерываний; координации и очередности обслуживания запросов; организации вывода; управления буферной памятью; резервирования временных областей; адаптивного управления.

При создании системы DNC необходимо строго указать расположение имеющихся в системе точек сопряжения отдельных ее составляющих. На рис. 11.5 приведены точки сопряжения компонентов системы DNC. Точки F и G зависят от вида системы ЧПУ. При традиционном управлении (BEHIND TAPE READER) информация поступает в систему ЧПУ или систему CNC после устройства считывания с перфолент (точка сопряжения F). В том случае, когда управляющая ЭВМ принимает функции согласования (например, в модулях CNC), точка сопряжения G может быть перемещена в сторону рабочей машины. При проектировании системы DNC следует исходить из того, что в ней будут использоваться известные и имеющиеся в наличии традиционные системы ЧПУ. Функции системы ЧПУ остаются при этом неизменными, ввод управляющей информации происходит, минуя устройство ввода с перфолент.

Дальнейшее развитие систем DNC привело к так называемому распределенному управлению. При этом выполнение сравнительно медленных функций, таких, как депонирование, грубая интерполяция и подготовка данных, возлагается на программное обеспечение УВМ. Функции распределенного управления — точная интерполяция и промежуточное (оперативное) хранение управ-

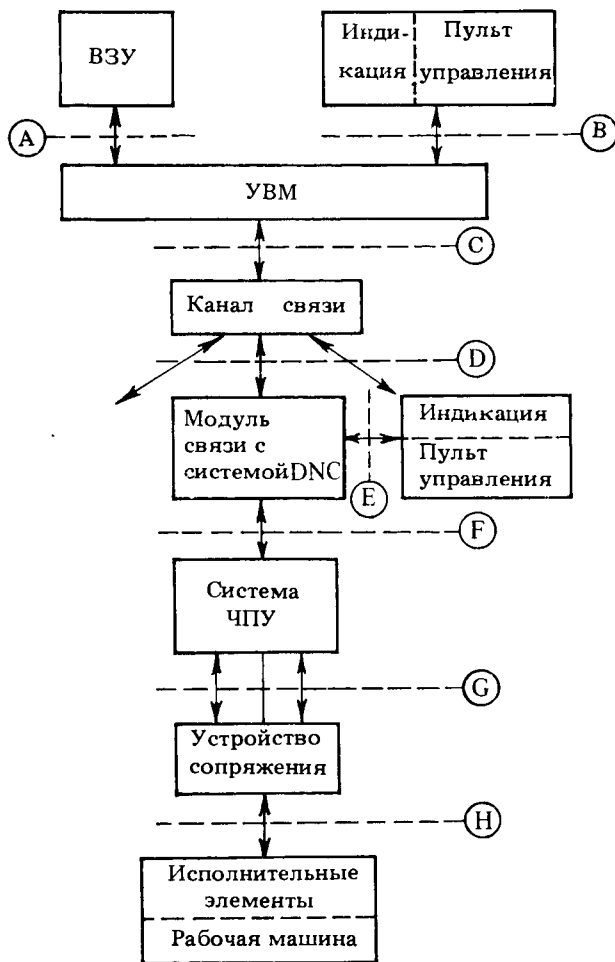


Рис. 11.5. Точки сопряжения компонентов системы DNC.

ляющей информации системы ЧПУ. Главным преимуществом распределенного управления является меньший уровень затрат аппаратных средств, недостатком — то обстоятельство, что при выходе из строя УВМ управление не может работать автономно.

Вследствие стремительного роста возможностей электронных устройств при одновременном снижении цен на них распределенное управление не имеет в настоящее время большого применения. В современных системах DNC используются автономные системы ЧПУ и системы CNC.

Как показывает опыт создания новых систем DNC и гибких производственных систем, стандартные интерфейсы не обеспечивают обмен данными в требуемом объеме.

Дальнейшее развитие технологических объектов, управляемых система-

ми ЧПУ, распространяется на диагностику как рабочей машины, так и технологического процесса, на управление загрузкой рабочей машины, на выполнение измерений, а также подготовку программ ЧПУ самой системой. Системы DNC различной степени сложности представляют собой целесообразные варианты решения перечисленных задач.

Новые системы DNC упрощенной конфигурации состоят из мини-ЭВМ, которая с помощью канала связи соединяется с системой ЧПУ и расположена вблизи рабочей машины. Дополнительная УВМ в этом случае не нужна. Системы такой конфигурации обладают возможностями подготовки и корректировки программ ЧПУ, их хранения и распределения. Функции сбора и оценки технологической информации для подобных систем не предусмотрены.

Для повышения производительности технологического оборудования необходимо улучшить условия хранения и распределения информации для систем ЧПУ. В промышленном производстве необходим непрерывный информационный поток между уровнем управления и уровнем производства. Можно выделить два информационных потока – организационной и технической информации. Технический информационный поток включает данные, необходимые для обработки отдельных деталей (геометрические размеры, технологические режимы, порядок обработки). В организационном информационном потоке следует выделить поток данных, поступающих на уровень производства с уровня управления (число деталей, сроки изготовления и т.д.), и поток данных, поступающих с уровня производства на уровень управления (качество изготовленных деталей, время изготовления и т.д.).

При использовании ЭВМ для обработки информационных потоков внутри предприятия проявляется иерархическая структура. На мини-ЭВМ возлагается реализация программ, управляющих быстродействующими процессами. Задачи планирования, конструирования выполняются центральной ЭВМ.

11. 3. ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЕМ

В системах централизованного управления оборудованием имеется вычислительный центр, состоящий из ЭВМ, устройств памяти и устройств связи с объектом. Примером такой системы является система автоматического группового управления станками АВГУСТ (рис. 11.6).

В помещении вычислительного центра установлена центральная ЭВМ, имеющая мультиплексный и селекторный каналы (МК и СК) для связи с внешними устройствами. К селекторному каналу подключены запоминающие устройства на магнитном барабане (ЗУМБ), магнитных дисках (ЗУМД) и магнитной ленте (ЗУМЛ), а также коммутатор селекторного канала (КСК).

К мультиплексному каналу подсоединены устройства ввода-вывода (УВВ), автономный графопостроитель (Г) и несколько коммутаторов мультиплексного канала (КМК). С помощью КМК в вычислительном центре могут подключаться дисплей (Д) и телетайп (Т). С помощью Д осуществляется корректировка программ путем видоизменения на экране размеров детали и инструмента, а также траектории их относительного движения.

К КМК присоединены линейные коммутаторы (ЛК), которые через устройства сопряжения (УС) и фотосчитыватели (ФС) соединены с интерполяторами, которыми оснащены станки (С).

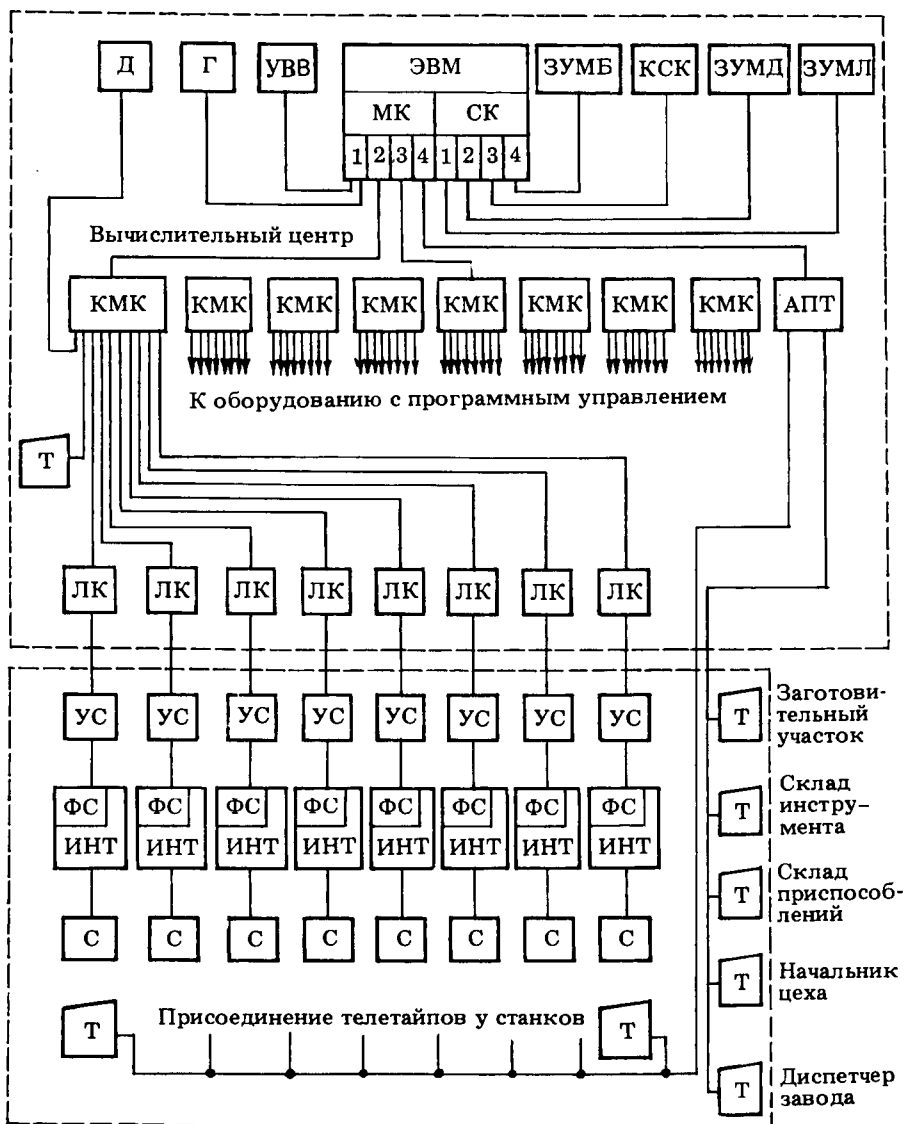


Рис. 11.6. Структура системы АВГУСТ.

УС линии с интерполяторами оборудованы визуальными индикаторами, показывающими номер передаваемой на станок программы и количество деталей, которое должно быть обработано по этой программе.

Центральная ЭВМ производит расчет управляющих программ. Полученная в результате расчета программа наносится на перфоленту. Затем с помощью графопостроителя производится предварительный контроль рассчитанной программы. После этого программа передается на станок. Если получен-

ная в результате реализации программы деталь имеет размеры, отклонения которых от заданных не превышают допусков, определяемых требуемой точностью, то программа вносится в библиотеку управляющих программ, размещенную на ЗУМЛ или ЗУМД.

Управляющие программы, которые будут использованы для станков, предварительно вводятся в ОЗУ ЭВМ. За каждым станком закреплена определенная зона ОЗУ. Связь между ОЗУ ЭВМ и станком осуществляется по команде от устройства сопряжения с интерполятором станка. Этой связью управляет специальная диспетчерская программа системы АВГУСТ, находящаяся в ОЗУ ЭВМ.

Для управления каждым станком по программе, полученной через канал МК, КМК и линейный коммутатор (ЛК), используется индивидуальная СПУ с встроенным интерполятором либо индивидуальная УВМ.

Передача управляющей программы производится по кадрам. Скорость передачи информации к интерполятору лимитируется быстродействием ФС, не превышающим 1000 строк перфоленты в секунду (1000 восьмиразрядных двоичных чисел в секунду). В то же время МК ЦВМ имеет значительно большее быстродействие. При этом обеспечивается работа станков без прерывания процесса резания, вызываемого задержками передачи информации.

Для управления группой станков центральная ЭВМ организует последовательную поочередную передачу управляющих программ СПУ отдельных станков.

Применение долговременных ЗУ позволяет расширить функциональные возможности системы, в частности увеличить объем библиотеки управляющих программ. К МК ЭВМ для улучшения взаимодействия с цеховым персоналом подключается аппаратура передачи данных (АПТ) по телефонным и телеграфным линиям. АПТ представляет собой коммутатор, соединяющий с ЭВМ большое количество телетайпов, выполняющих функции УВВ информации.

Телетайп, установленный в заготовительном цехе, передает информацию о необходимой номенклатуре заготовок и о порядке их подачи на станки. Телетайпы на складах инструмента и приспособлений передают информацию о требуемых инструменте и приспособлениях. Телетайпы служат для передачи оперативной информации от станков, вспомогательных участков, начальника цеха и диспетчера завода к центральной ЭВМ. Можно, например, с помощью телетайпа изменять порядок работы станка, перейти к отработке другой детали. Через телетайп, находящийся у станка, может быть передана вся информация об использовании станка за смену. Этот же телетайп используется для отладки программы станка.

К групповым КМК вместо станков через соответствующие каналные коммутаторы, ЛК и аппаратуру сопряжения могут присоединяться устройства программного управления или УВМ роботов-манипуляторов, автоматизирующие вспомогательные операции по обслуживанию станков.

Коммутатор КСК может быть использован для связи ЦВМ с любой УВМ станков и других ЭВМ. С помощью КСК можно, например, организовать прием управляющих программ, рассчитанных на других ЭВМ.

11.4. ЛОКАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

Установлено, что объем информации, который должен обрабатываться в процессе управления производством, приблизительно пропорционален квадрату объема выпускаемой продукции. Несвоевременное или неполное решение возникающих информационных задач приводит к значительным потерям из-за отклонений от оптимального хода процессов и возникновения организационных неполадок.

Объем информационных задач, необходимых для управления промышленностью нашей страны, уже в настоящее время превышает $1 \cdot 10^{16}$ эквивалентных арифметических операций в год. Для решения этих задач вручную на арифмометрах потребовалось бы более 10 млрд операторов. В то же время быстро растет объем документации, связанной с функционированием предприятий и учреждений. Для изготовления такой документации (приказов, отчетов, сводок данных, расчетов, чертежей, проектов и т.д.) используется труд нескольких миллионов человек и расходуется колоссальное количество бумаги.

Ясно, что дальнейший технический прогресс требует быстрого развития новых методов управления, основанных на применении вычислительной техники. Рождаются новые поколения ЭВМ, совершенствуется их математическое и программное обеспечение. Наряду с автономными вычислительными комплексами создаются вычислительные сети — многомашинные комплексы сбора, хранения и обработки информации. Первоначально вычислительные сети организовывались для обмена информацией только между крупными вычислительными центрами. С появлением микропроцессоров и микроЭВМ возникла возможность создания более дешевых локальных вычислительных сетей (ЛВС).

ЛВС выполняются различной сложности в зависимости от предъявляемых к ним требований. Скорость передачи кадров наиболее распространенных ЛВС 1—10 Мбод; максимальное расстояние между абонентами 2—5 км; число абонентов 256—1024. Такие ЛВС могут успешно использоваться в автоматизированных системах управления, в системах автоматизированного проектирования, центрах машинной обработки документальной информации и др.

Функционирование подобных систем требует установления прямых информационных связей между различными процессами пользователя. Процессы пользователя представляют собой отдельные задачи или комплексы задач, которые находятся в эксплуатации в вычислительных центрах и требуют постоянного доступа к данным, программам, периферийным устройствам и памяти, расположенным в различных местах на территории, обслуживаемой ЛВС.

Установление связей между процессами в ЛВС осуществляется с помощью функциональной среды (рис. 11.7), которая должна обеспечивать выполнение протоколов (свода правил) связи. Для малых ЛВС в качестве функциональной среды используется моноканал, имеющий форму общей шины или кольца. Такой моноканал допускает автономную работу подключенных к нему абонентских вычислительных комплексов и представляет собой основу для создания наиболее дешевых ЛВС, объединяющих мини- и микроЭВМ пользователей. Для реализации протоколов с целью повышения быстродействия в ЛВС ряд действий выполняется не программным, а аппаратным способом (путем использования схемной логики).

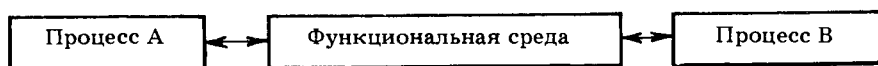


Рис. 11.7. Связь между процессами через функциональную среду.

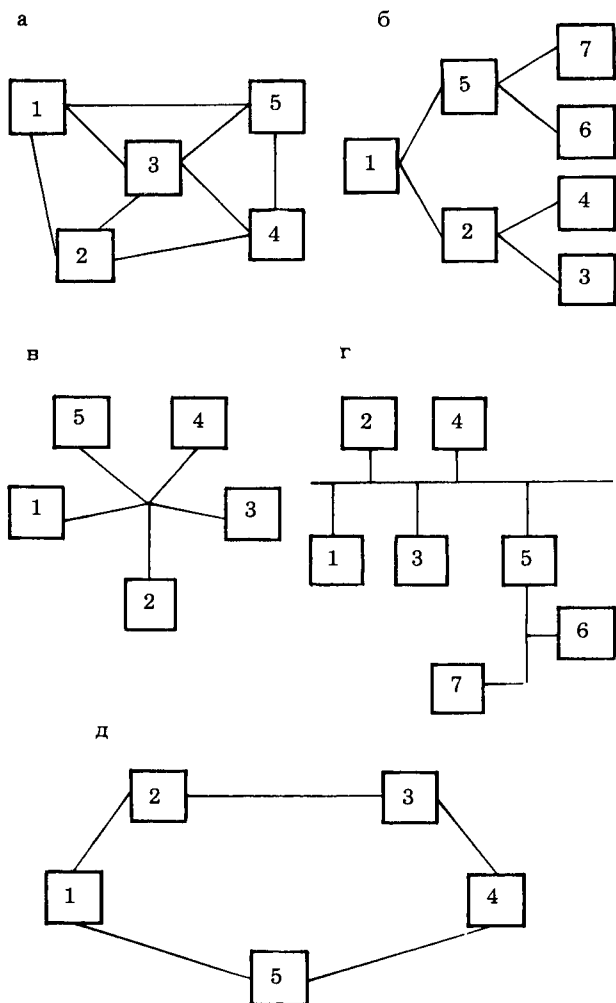


Рис. 11.8. Типовые конфигурации ЛВС.

ЛВС классифицируются по топологии, методам управления, программному и техническому обеспечению.

По топологическому признаку различают ЛВС с непосредственными связями (рис. 11.8, а), с иерархической конфигурацией (рис. 11.8, б), с конфигурацией типа "звезда" (рис. 11.8, в), с конфигурацией в виде общей шины (рис. 11.8, г) и с конфигурацией типа "кольцо" (рис. 11.8, д).

Конфигурация с непосредственными связями всех устройств сети позволяет использовать для каждой линии связи различные методы передачи и наиболее простое программное обеспечение. Недостатком такой ЛВС является большое число используемых каналов, что значительно повышает стоимость системы передачи данных и ЛВС в целом.

Иерархическая конфигурация характеризуется промежуточными узлами, которые включаются между двумя соединяемыми узлами (или группами узлов). Промежуточные узлы служат для установления связи между взаимодействующими узлами. В промежуточных узлах обычно происходит накопление и преобразование передаваемой информации. Недостаток этого метода заключается в сложности логической и программной структуры ЛВС.

При *конфигурации типа "звезда"* каждый узел имеет доступ к центральной станции, которая, обнаружив сигнал вызова, осуществляет однонаправленное соединение двух взаимодействующих узлов. Достоинством данной системы является простота логической и программной структуры. Однако такая система характеризуется низкой скоростью передачи данных, сложностью коммутирующей центральной станции и низкой эффективностью использования линий связи.

Конфигурация в виде шины является наиболее перспективной для ЛВС, предназначенных для АСУТП. Она отличается простой логической и программной структурой, позволяет очень просто осуществить расширение сети путем присоединения к магистрали дополнительных модулей. Достоинством этой конфигурации являются также простота методов управления, возможность работы в параллельном коде (при наличии дополнительных линий связи), а также двунаправленной передачи, отсутствие необходимости в централизованном управлении. К недостаткам системы следует отнести трудность передачи данных на большие (больше 500 м) расстояния, последовательный характер использования магистрали (по шине может в определенный момент времени проходить только один кадр передачи).

Конфигурация типа "кольцо" относится к структурам со слабой централизацией управления. В кольцевой ЛВС различные ЭВМ или терминалы включены в разрез кольца, образованного отрезками коаксиального кабеля, который соединяет через соответствующие вводные устройства (интерфейс) соседние станции (ЭВМ, терминалы). Кольцевая конфигурация позволяет получать достаточно надежные и дешевые ЛВС при среднем быстродействии узлов.

Управление ЛВС в значительной мере состоит в организации коллективного использования ресурсов функциональной среды передачи данных. Для мультисканальных ЛВС различают методы управления с детерминированным и случайным доступом к моноканалу. Детерминированным доступом к моноканалу характеризуются методы вставки регистра, циклического опроса, централизованный и децентрализованный, маркерные. К методам со случайным доступом к моноканалу относятся различные методы состязаний (с прослушиванием моноканала до передачи и во время передачи) и методы с прогнозированием столкновений. По типу программного обеспечения различают ЛВС с многоуровневыми и двухуровневыми сетевыми интерфейсами. Многоуровневые многоузловые ЛВС используют сложные протоколы, определяющие порядок управления линией передачи данных, условия, при которых устанавливаются и прерываются логические пути обмена данными, а также форматы упаковки

данных и управляющей информации в стандартные пакеты.

Программное обеспечение многоуровневой ЛВС реализует семь уровней: 1) физический; 2) канальный; 3) сетевой; 4) транспортный; 5) сеансовый; 6) предварительный; 7) прикладной.

Большая часть ЛВС имеют двухуровневые сетевые интерфейсы. Они выполняются одноузловыми. Единственным коммуникационным узлом такой системы является моноканал. Программное обеспечение таких ЛВС соответствует упрощенным протоколам, реализующим два уровня: физический и канальный. При этом канальный уровень обычно подразделяется на два подуровня, осуществляющие функцию многократного доступа к моноканалу и функцию селекции, т.е. отбора кадров из общего потока информации в моноканале.

По техническому обеспечению различают гомогенные и гетерогенные ЛВС. *Гомогенные ЛВС* имеют во всех станциях однотипное оборудование, например только комплексы машинной графики. *Гетерогенные ЛВС* позволяют включать в качестве абонентских комплексов различные устройства — от специализированных дисплеев для приема и передачи текстов документов до высокопроизводительных вычислительных комплексов с развитой терминальной сетью.

ЛИТЕРАТУРА

- Автоматизация типовых технологических процессов и промышленных установок / А.М. Корытин, Н.К. Петров, С.Н. Радимов и др. — Киев: Вища шк., 1980. — 372 с.
- Агрегатные комплексы технических средств АСУ ТП: Справочник / Н.А. Боборыкин, А.Л. Андреев, В.П. Теленков и др. — Л.: Машиностроение, 1985. — 271 с.
- Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 392 с.
- Бойченко Е.В., Кальфа В., Овчинников В.В. Локальные вычислительные сети. — М.: Радио и связь, 1985. — 304 с.
- Булгаков А.А. Программное управление системами машин. — М.: Наука, 1980. — 264 с.
- Глушков В.М. Введение в АСУ. — Киев: Техника, 1974. — 310 с.
- Гумен В.Ф., Калининская Т.В. Следящий шаговый электропривод. — Л.: Энергия, Ленингр. отд., 1980. — 168 с.
- Гусев И.Т., Елисеев В.Г., Маслов А.А. Устройства числового программного управления. — М.: Высш. шк., 1986. — 296 с.
- Динамика следящих приводов / Б.И. Петров, В.А. Полковников, Л.В. Рабинович и др. — М.: Машиностроение, 1982. — 496 с.
- Егоров Ю.Н. Системы приводов промышленных роботов. — Л.: ЛГУ, 1982. — 336 с.
- Использование станков с программным управлением: Справочное пособие / Под ред. В. Лесли. — М.: Машиностроение, 1976. — 421 с.
- Киселев В.М. Фазовые системы числового программного управления станками. — М.: Машиностроение, 1978. — 352 с.
- Колосов В.Г., Мелехин В.Ф. Проектирование узлов и систем автоматики и вычислительной техники. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 256 с.
- Мясников В.А., Игнатьев М.Б., Покровский А.М. Программное управление оборудованием. — 2-е изд. — Л.: Машиностроение, 1984. — 427 с.
- Ратмиров В.А. Основы программного управления. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
- Робототехника / Ю. Д. Андрианов, Э.П. Бобриков, В.Н. Гончаренко и др. — М.: Машиностроение, 1984. — 288 с.
- Робототехника и гибкие автоматизированные производства. Кн. 1: Макаров И.М. Системные принципы создания гибких автоматизированных производств. — М.: Высш. шк., 1986. — 175 с.
- Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. — М.: Высш. шк., 1980. — 424 с.
- Соколов О.А. Контурные системы числового программного управления станками и промышленными роботами. — Л.: ЛПИ, 1982. — 81 с.
- Сосонкин В.Л. Микропроцессорные системы числового программного управления станками. — М.: Машиностроение, 1985. — 288 с.
- Управляющие системы промышленных роботов / Ю.Д. Андрианов, Л.Я. Глейзер, М.Б. Игнатьев и др. — М.: Машиностроение, 1984. — 288 с.
- Юревич Е.И. Основы робототехники. — Л.: Машиностроение, 1985. — 285 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автомат комбинационный 67
 - управляющий 67
- Алгоритм управления объектом 52
 - функционирования ПК 75
- Аппаратное обеспечение прямого цифрового управления 271
- Вычислитель 16
- Вычислительные сети 276
- Гибкая автоматизированная линия 26
- Гибкий автоматизированный завод 26
 - – модуль 26
 - – участок 26
 - – цех 26
- Гибкое автоматизированное производство 20
- Годографы вектора напряжения ШД 175
- Датчики перемещений индукционные 200
 - – абсолютные (кодовые) 195, 199
 - – импульсные 206
 - – интерферометрические 211
 - – кодовые 208
 - – лазерные 211
 - – относительные 199
 - – потенциометрические 200
 - – цифровые 204
- Двоичный умножитель 164
- Дифференциальный анализатор 159
- Дробление шага электрическое 171
- Измерение перемещений косвенное 195
 - – прямое 195
- Импульсное управление ШД 170
- Интегратор аналоговый 161
 - с параллельным переносом 165
 - с последовательным переносом 163
 - цифровой 161
- Интерполяторы 140
 - автономные 140
 - встроенные 140
 - круговые по методу оценочной функции 153
 - линейные 140
 - линейные по методу оценочной функции 147
 - на цифровых дифференциальных анализаторах 159
 - нелинейные 140
 - по методу цифрового интегрирования 164
- Информация априорная 215, 264
 - исходная 215
 - текущая 215, 264
- Кадр программы 101
- Классификация ЛВС 276
 - режимов работы привода с ШД 190
 - РТК 29
 - систем управления роботами 249
 - СПУ 32
- Код 88
 - арифметический 97
 - буквенно-цифровой 88, 102
 - вспомогательной функции 108
 - выбора инструмента 108
 - Грея 97
 - двоично-десятичный 94
 - – – взвешенный 94
 - – – самодополняющийся 94
 - единично-десятичный 93
 - единичный (унитарный) 93
 - избыточный 108
 - комбинаторный 97
 - нормальный двоичный 7, 93
 - однопеременный 97
 - помехоустойчивый 108
 - простой 108
 - скорости шпинделя 108
 - циклический 97
- Кодирование помехоустойчивое 108
- Комбинационные схемы 66
- Коммутатор 58, 181
 - фаз 181
- Коммутация многозаходная 174
 - разнополярная 170
- Компоновка робототехнических комплексов 30
- Контроль по модулю 102
 - на четность (нечетность) 109
- Конфигурация ЛВС 277

- Копир 7
- Круговой индуктосин 203
- Линейный индуктосин 202
- Мажоранта 56
- Мажоритарный элемент 56
- Манипуляторы 20
- Машинная подготовка управляющих программ 118
- Метод оценочной функции 142, 147
 - цифрового интегрирования 142, 164
- Микрокоманда 16, 67
- Микрооперация 67
- Микропрограммный автомат 67
- Мнемокод 88
- Момент статический синхронизирующий 186
- Мультиплексор 58
- Направление осей координат 108
- Одиночная ошибка кодирования 109
- Однополярное потенциальное несимметричное управление ШД 169
 - — симметричное управление ШД 169
- Параметры ШД 177
- Перевод чисел из одной системы счисления в другую 91
- Постпроцессор 121
- Преобразователь "код—напряжение" 218
 - "код—фаза" 231
- Препроцессор 121
- Привод подачи 233
- Приемистость пуска ШД 179
- Программатор 54
- Программирование роботов 129
 - — аналитическое 129, 133
 - — — с использованием модели внешней среды 134
 - — — явное 134
 - — обучением 129
 - — речевое 129
 - — ручное 129
- Программируемые контроллеры 74
- Программируемые логические матрицы 71
 - — — комбинационной логики 71
 - — — с памятью 71
- Программное обеспечение многоуровневой ЛВС 279
 - управление 11
- Процессор 121
- Пульт циклового управления микропроцессорный 83
- Размерные слова 107
- Разряд (порядок) числа 88
- Распределители импульсов 181
- Регулятор аналоговый 237
 - положения 235
 - пропорционально-интегральный 238, 240
 - пропорциональный 238
 - скорости 235
- Режимы работы ШД 190
- Робот 20
 - дозатор 38
 - залившик 40
 - порталный 43
 - промышленный 11
- Робототехнический комплекс производства кузнечного 34
 - — — листоштамповочного 36
 - — — литейного 37
 - — — мелкосерийного 43
 - — — механической обработки 40
 - — — токарной обработки 41
- Ручная подготовка управляющих программ 113
- Сети вычислительные 276
 - локально-вычислительные гетерогенные 279
 - — — гомогенные 279
- Система автоматизированного программирования 118, 120
 - — проектирования 27
 - централизованного управления оборудованием 263
 - числового программного управления 32
 - — — многоцелевая 32
 - счисления 88
 - — восьмеричная 89
 - — двоичная 89
 - — непозиционная 88
 - — позиционная 88
 - — шестнадцатеричная 89
- Системное программное обеспечение 33
- Системы управления роботами автоматические 248
 - — — интерактивные 249
 - — — диалоговые 249
 - — — командные 248
 - — — контурные 256
 - — — микропроцессорные 258
 - — — позиционные 253

- — — полуавтоматические 248
- — — УКУ-552, УКУ-772 256
- — — УПМ-331, УПМ-552, УПМ-772 253
- — — УЦМ-10, УЦМ-20, УЦМ-30 251
- — — цикловые 250
- — — человеко-машинные 248
- ЧПУ импульсно-фазовые 225
- контурно-позиционные 216
- контурные 215
- — позиционные 215, 228
- — с ШД 193
- — фазовые 221
- Скорость подачи 116
- Слово подачи 107
 - подготовительной функции 106
 - программы 101
- Собственная частота ШД 186
- Способ задания программы адресный 102
 - — — кадрами переменной длины 101
 - — — постоянной длины 101
- Способы возбуждения ШД 168
- Станок копировально-фрезерный 8
 - многооперационный ("обрабатывающий центр") 14
 - токарно-копировальный 7
 - с ЧПУ 15
 - фотокопировальный 8
- Структура ГАП 27
 - ШИМ 70
 - позиционного привода 216, 235
 - порогового элемента 55
 - САП 121
 - системы прямого цифрового управления 268
- Структуры РТК кузнечного производства 35
 - шаговых приводов 192
- Схема функциональная позиционного следящего ЭП 216
 - управления ПК 77
- Схемы двухуровневые комбинационные 66
 - контроля четности (нечетности) 109
- Трансформатор вращающийся 200
- Управление двухчастотное ШД 172
 - децентрализованное 263
 - импульсное ШД 170
 - комбинированное 263
 - однополярное потенциальное ШД 169
 - позиционной системой 229
 - стартопное ШД 188
 - централизованное 273
- Управляющая программа 113
- Уравнения ШД 183
- Устройство арифметико-логическое 16
 - ЧПУ 32
 - "Контур 4 МИ" 12
 - Н-55 16
- Функции прямого цифрового управления 267
- Централизованное управление 273
- Цикловые системы ПУ 52
- Циклограмма 53
- Частота приемистости ШД 179
- Число по модулю 102
- Шаговый двигатель индукторно-реактивный 168
 - — индукторный 167
 - — реактивный 168
 - — редукторный 168
 - — с активным ротором 167
- Экономическая эффективность робототехники 48
- Экономичность системы счисления 91
- Электрическое дробление шага 171
- Электромагнитная редукция 168
- Электропривод 11
 - подачи 233
 - позиционный 167
 - с двигателями постоянного и переменного тока 167
 - с ШД 167
- Элемент мажоритарный 56
 - пороговый 55
- Язык входной 122
- Языки программирования 122
 - — роботов 135
 - — станков с ЧПУ 122
 - систем автоматизированного программирования 122

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список сокращений	4
1. Робототехнические комплексы и роботизированные производства	7
1.1. История развития систем числового программного управления и роботизированных технологических комплексов	7
1.2. Структуры и функции систем числового программного управления и робототехнических комплексов	26
1.3. Робототехнический комплекс кузнечного производства	34
1.4. Робототехнический комплекс листоштамповочного производства	36
1.5. Робототехнический комплекс литейного производства	37
1.6. Робототехнические комплексы механической обработки	40
1.7. Социально-экономические аспекты применения систем числового программного управления и робототехнических комплексов	48
2. Системы циклового программного управления	52
2.1. Функциональный состав и программирование цикловых систем программного управления	52
2.2. Применение многофункциональных элементов и универсальных логических модулей	55
2.3. Матричная реализация комбинационных схем	64
2.4. Микропрограммные автоматы	67
2.5. Программируемые контроллеры	74
2.6. Микропроцессорный пульт управления	83
3. Кодирование информации и цифровые коды	88
3.1. Кодирование информации	88
3.2. Цифровые коды	93
3.3. Повышение надежности кодов	98
3.4. Способы задания программной информации	100
3.5. Международный двоично-десятичный код ISO-7 bit	104
3.6. Контроль информации в коде ISO-7 bit	108
4. Подготовка управляющих программ для систем ЧПУ	113
4.1. Ручная подготовка управляющих программ	113
4.2. Машинная подготовка управляющих программ	118
4.3. Языки САП	122
4.4. Программирование промышленных роботов	127
4.5. Аналитическое программирование промышленных роботов	133
4.6. Языки программирования промышленных роботов	135
5. Преобразование программной информации	140
5.1. Интерполяторы	140
5.2. Линейная интерполяция по методу оценочной функции	147
5.3. Круговая интерполяция по методу оценочной функции	153
5.4. Интерполяторы на цифровых дифференциальных анализаторах	159
5.5. Метод цифрового интегрирования	164
6. Устройство управления оборудованием с программным управлением и робототехническими комплексами	167
6.1. Электроприводы, применяемые в системах числового программного управле-	

ния и в робототехнических комплексах	167
6.2. Способы управления шаговыми двигателями	168
6.3. Схемы управления шаговыми двигателями	180
6.4. Общие уравнения электропривода с шаговыми двигателями	183
6.5. Режимы работы шаговых двигателей	185
6.6. Структуры шагового электропривода	191
6.7. Системы числового программного управления с шаговым двигателем	193
7. Измерение перемещений в оборудовании с программным управлением	195
7.1. Общая характеристика принципов и методов измерения перемещений	195
7.2. Аналоговые датчики перемещений	200
7.3. Цифровые датчики перемещений	204
8. Контурные и позиционные системы программного управления	215
8.1. Общая структура систем числового программного управления	215
8.2. Системы числового программного управления с импульсным датчиком перемещения и преобразователем "код—напряжение"	217
8.3. Импульсно-фазовые системы числового программного управления	221
8.4. Позиционные системы программного управления	228
9. Точность воспроизведения заданных движения в системах программного управления	233
9.1. Настройка позиционных приводов при отработке заданных перемещений	233
9.2. Взаимосвязанное управление при обработке сложных траекторий	244
10. Системы управления роботами	247
10.1. Структура и классификация систем управления	247
10.2. Цикловые системы управления	250
10.3. Устройства позиционного управления	253
10.4. Устройства контурного управления	256
10.5. Микропроцессорная система управления универсальным промышленным роботом	258
11. Системы управления робототехническими комплексами от ЭВМ	263
11.1. Материальные и информационные потоки роботизированного технологического комплекса	263
11.2. Системы с прямым цифровым управлением	265
11.3. Централизованное управление оборудованием	273
11.4. Локальные вычислительные сети	276
Литература	280
Предметный указатель	281

Учебное издание

Ильин Олег Павлович,
Козловский Константин Иванович,
Петренко Юрий Николаевич

**СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ
УСТАНОВКАМИ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

Заведующий редакцией *А. Ф. Зиновьев*

Редактор *Н. М. Латышева*

Младшие редакторы *С. А. Когадеева, Т. И. Крючкова*

Художественный редактор *Ю. С. Сергачев*

Технический редактор *Л. И. Счисленок*

Корректор *З. Б. Звонарева*

Оператор *И. В. Скубий*

ИБ № 2654

Подписано в печать с оригинала-макета 19.05.88. АТ 12596. Формат 60х90 1/16. Бумага офсет. Гарнитура Пресс Роман. Офсет печать. Усл. печ.л. 18. Усл. кр.-отт. 18. Уч.-изд. л. 20,13. Тираж 9100 экз. Зак. 6313. Цена 1 р. 10 к.

Издательство "Вышэйшая школа" Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 220048, Минск, проспект Машерова, 11.

Типография "Победа". 222310, Молодечно, ул. Тавлая, 11.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В 1988 г.

издательство

„ВЫШЕЙШАЯ ШКОЛА“

выпускает в свет учебное пособие

**Применение управляющих вычислительных машин / А.Н. Морозевич,
А.В. Николаев, А.П. Пашкевич, А.А.Петровский**

Объем 16,92 л. Цена 1 р.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальностям группы 21 "Автоматика и управление". Может быть полезно преподавателям, аспирантам, а также инженерно-техническим работникам промышленных предприятий.

Книга подготовлена на основании программы курса обучения по одноименной дисциплине и рассматривает все вопросы, рекомендуемые этой программой. Определены место и роль вычислительных машин в системах управления. Изложены принципы организации технического, программного и алгоритмического обеспечения управляющих вычислительных комплексов (УВК). Даны сведения по проектированию и применению управляющих мини- и микроЭВМ. Внимание акцентируется на широком классе программно совместимых машин (СМ-4, СМ-1420, "Электроника-60", "Электроника-100/25", ДВК различных моделей) и микропроцессорных комплектов (большие интегральные микросхемы серий К1801, К1804, К588 и др.). Теоретические выкладки дополнены конкретными примерами применения УВК для управления исполнительными приводами электромеханических роботов и стендовыми испытаниями изделий сложной техники.