ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Б. В. ШАНДРОВ, А. А. ШАПАРИН, А. Д. ЧУДАКОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА (МЕТАЛЛООБРАБОТКА)

УЧЕБНИК

Допущено Экспертным советом по начальному профессиональному образованию Минобразования России в качестве учебника для учреждений начального профессионального образования

Москва
ACADEMA
2004

УДК 65.011.56
ББК 32.965(34.5)
Ш20

Рецензент —
преподаватель ПЛ № 313 г. Зеленограда
канд. техн. наук, доцент *В. М. Прошина*

Шандров Б. В.

Ш20 Автоматизация производства (металлообработка): Учебник для нач. проф. образования / Б. В. Шандров, А. А. Шапарин, А. Д. Чудаков. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 256 с.

ISBN 5-7695-1753-0

Рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с автоматизацией производства на предприятиях, имеющих металлообрабатывающие процессы. Изложены основные направления и возможности автоматизации в современных условиях.

Для учащихся учреждений начального профессионального образования.

УДК 65.011.56
ББК 32.965(34.5)

© Шандров Б.В., Шапарин А.А., Чудаков А.Д., 2002
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2002
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2004

ISBN 5-7695-1753-0

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное машиностроение отличается интенсивным расширением многообразия выпускаемой продукции. Одновременно происходит сокращение продолжительности цикла выпуска изделий одного вида. Объемы выпуска продукции, как и прежде, изменяются в широком диапазоне — от единичных образцов до массового производства. Однако преобладающим начинает становиться мелко- и среднесерийное производство.

Развитие объектов машиностроительного производства (автомобилей, тракторов, станков, локомотивов и пр.) характеризуется интенсивным ростом сложности машин и ужесточением требований к их качеству. За последние 25 — 30 лет сложность машин как объекта производства увеличилась в 4 — 6 раз. Повышение технических характеристик машин и увеличение числа их функций приводит к увеличению числа деталей и сборочных единиц, входящих в машину, усложнению их конструкции и повышению точности изготовления, замене традиционных материалов на новые, обладающие улучшенными физико-механическими свойствами. В этих условиях автоматизация основных и вспомогательных технологических процессов служит основным средством повышения эффективности производства.

В автоматизированном производстве резко повышаются требования к качеству каждого этапа производственного цикла, организации переналаживаемых, гибких технологических процессов и применению технологий с малым участием людей. Поэтому при внедрении автоматизации большое внимание уделяется использованию микропроцессоров и электронно-вычислительной техники, гибких производственных систем, автоматизации контроля и управления технологическими процессами, загрузки оборудования, транспортировки деталей и сборочных единиц.

Автоматизация способствует интенсификации технологических процессов и снижению себестоимости изготовления изделий машиностроения, в корне меняет условия работы в промышленности, сглаживая противоречия между трудом умственным и физическим.

Как учебная дисциплина автоматизация производства имеет большое значение в подготовке специалистов для машиностроения, поскольку ее изучение дает знания, необходимые для разработки и применения в производстве высокопроизводительных методов и средств автоматизации.

ГЛАВА 1
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

1.1. Изделие и его элементы

Изделием в машиностроении называется любой предмет производства, подлежащий изготовлению на предприятии. Изделием может быть машина, агрегат, сборный элемент агрегата (сборочная единица) и даже отдельная деталь.

Деталь изготавливается из одного материала без применения сборочных операций. Характерный признак детали — отсутствие в ней разъемных и неразъемных соединений (рис. 1.1).

Сборочная единица — это изделие, составные части которого соединены в процессе производства. Различают составные части первого, второго и более высокого порядка. Составная часть первого порядка входит непосредственно в конструкцию изделия. Она состоит из отдельных деталей и частей второго порядка. Составная часть наивысшего порядка разделяется только на детали.

Агрегат — это составная часть машины определенного функционального назначения, собранная из сборочных единиц и де-

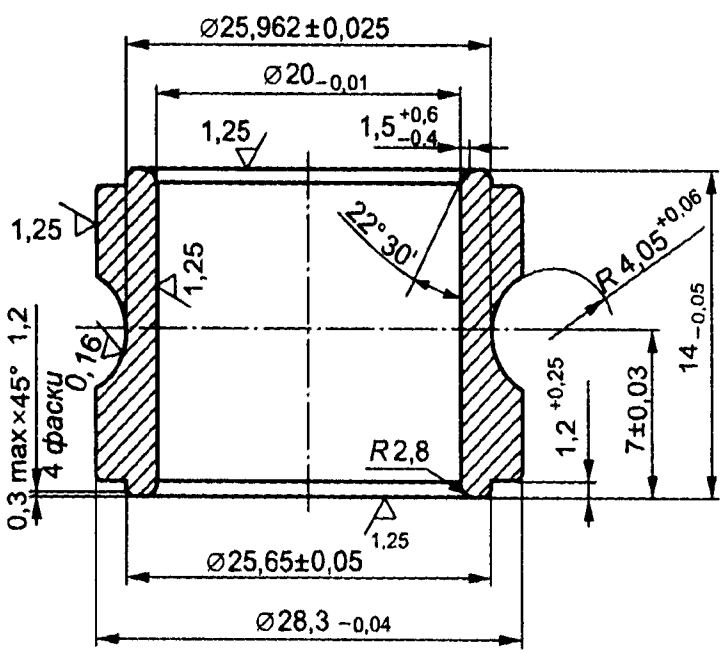


Рис. 1.1. Типовая машиностроительная деталь типа тела вращения

талей, которая выполняет определенные функции (например, двигатель автомобиля, шпиндель станка и др.).

1.2. Производственные и технологические процессы

Производственным процессом называется совокупность всех этапов производства изделия. Производственный процесс включает в себя изготовление заготовок деталей, различные виды их обработки, контроль качества, сборку и испытание агрегатов и машин. На предприятиях производственный процесс делится на части, которые размещаются по отдельным цехам или корпусам: кузнечно-прессовое, литейное, механосборочное, инструментально-штамповое производства и др.

Технологическим процессом называется часть производственного процесса, которая непосредственно связана с механической и термической обработкой или со сборкой изделия. В процессе механической обработки происходит изменение формы и размеров обрабатываемой заготовки. Термическая обработка применяется для того, чтобы придать материалу детали необходимые эксплуатационные свойства (твердость, износостойкость) путем изменения его физических свойств. В процессе сборки (агрегата) машины устанавливаются необходимые взаимосвязи деталей и сборочных единиц.

1.3. Структура технологического процесса

Любой технологический процесс машиностроительного производства состоит из отдельных операций.

Операцией называется часть технологического процесса, выполняемая непрерывно над определенной деталью (объектом производства) одним рабочим (или группой рабочих) на одном рабочем месте. Таким образом, операция характеризуется неизменностью объекта производства, оборудования (рабочего места) и исполнителей. Операция является основной единицей производственного планирования. Загрузка оборудования, пропускная способность цеха (участка), число рабочих всегда рассчитываются исходя из длительности операции.

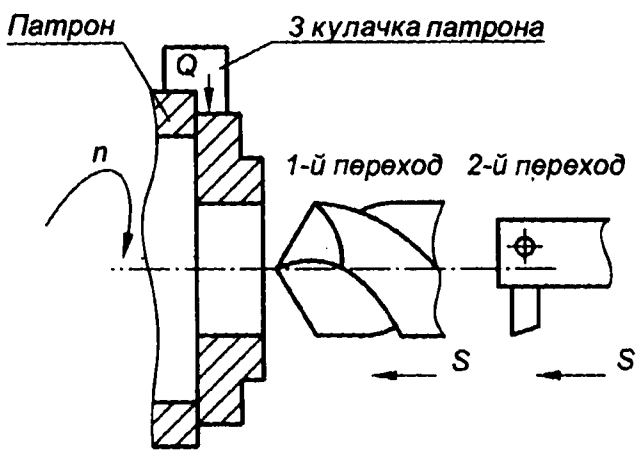


Рис. 1.2. Схема токарно-сверлильной обработки детали типа тела вращения:
n — частота вращения патрона; *S* — подача инструмента; *Q* — сила закрепления детали

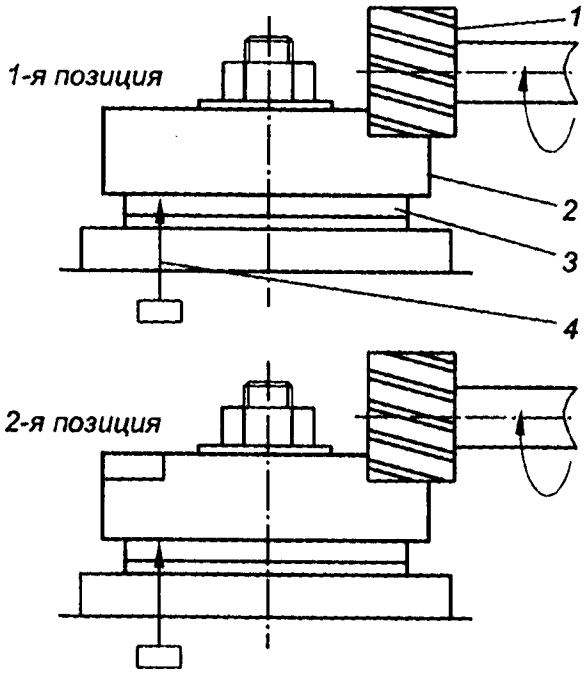


Рис. 1.3. Схема фрезерной обработки уступов заготовки:
1 — инструмент; *2* — обрабатываемая деталь; *3* — поворотный стол; *4* — фиксатор поворотного стола

Применительно к технологическим процессам механической обработки операция делится на переходы и проходы.

Переходом называется часть операции, которая характеризуется неизменностью обрабатываемой поверхности, режущего инструмента и режима обработки. На рис. 1.2 показана схема обработки отверстия в детали, закрепленной в самоцентрирующемся патроне токарного станка, которая осуществляется в два перехода: первый — сверление, второй — растачивание отверстия.

Переход может состоять из двух или нескольких проходов. *Проход* осуществляется за один рабочий ход режущего инструмента. На рис. 1.2 приведена схема обработки детали, при которой отверстие можно растачивать в два прохода.

В заводской практике часто используются понятия *установ* и *позиция*.

Установом называют часть операции, которая выполняется при одном закреплении детали на станке. Одному установу могут соответствовать различные положения детали относительно станка. Каждое такое положение называется *позицией*. На рис. 1.3 показана схема позиционной обработки двух уступов заготовки при одном установе с помощью поворотного стола станка.

1.4. Трудоемкость и станкоемкость процесса

Время, затраченное рабочим на выполнение операции или технологического процесса обработки (сборки) детали, называется *трудоемкостью*. Трудоемкость процесса T определяется отношением

$$T = f/Q,$$

где f — число рабочих, занятых в процессе; Q — число деталей, обработанных всеми рабочими в единицу времени (производственного процесса).

Единица измерения трудоемкости процесса — человекочас. Трудоемкость служит основным технико-экономическим параметром процесса, определяющим требуемое количество рабочих.

Трудоемкость операции складывается из отдельных рабочих приемов. *Приемом* называется определенное законченное действие рабочего при выполнении операции, т.е. действие, которое можно пронормировать временем его выполнения (например, пуск станка, включение подачи, снятие детали и т.д.).

Чтобы определить количество оборудования, необходимого для выполнения технологического процесса, применяется еще один технико-экономический параметр — станкоемкость. *Станкоемкость* определяется временем, в течение которого оборудование занято для выполнения операций технологического процесса. Единицей измерения станкоемкости является станкочас.

Станкоемкость процесса $T_д$ вычисляется в соответствии с зависимостью

$$T_д = \frac{C}{Q}\eta_{загр},$$

где C — количество оборудования (станков), занятого в процессе; Q — число деталей, обработанных в процессе за единицу времени (час, смену); $\eta_{загр}$ — коэффициент загрузки оборудования.

Если в технологическом процессе на каждом станке работает один рабочий ($f = n$), то трудоемкость и станкоемкость различаются только коэффициентом загрузки оборудования $\eta_{загр}$. Чем выше уровень автоматизации процесса, тем выше $\eta_{загр}$ за счет снижения трудоемкости.

1.5. Классификация технологических процессов

Классификацию технологических процессов проводят по определенным признакам, важнейшими из которых являются:

- технологический признак;
- программа выпуска и номенклатура (разнообразие) изделий;
- метод организации производства;
- степень концентрации операций.

1.5.1. Технологические процессы и типы производства

По технологическому признаку производство машин различается технологическими процессами: механообработки, сборки, литья, штамповки, сварки, окраски и т.д. Наиболее высокий уровень автоматизации достигается в механообрабатывающих процессах (до 80 %), самый низкий — в сборочных процессах (15... 20 %). Сборку технологически трудно (и дорого) автоматизировать, так как для соединений деталей требуется выполнять сложные движения. Поэтому сборочные цеха наиболее многолюдные.

По признаку «номенклатура изделий» различают три типа производства: единичное, серийное и массовое.

Единичным называется производство, при котором изделия разнообразной конструкции изготавливают в единичных экземплярах, причем повторяемость этих изделий заранее не планируется. Поэтому этот тип производства должен быть технологически гибким, для чего необходимо его оснащение универсальным оборудованием и инструментом. Технологические процессы в единичном производстве строятся таким образом, что на одном станке выполняется последовательно большое число переходов и часто — полная обработка деталей. Это обусловливает относительно высокую себестоимость изделий.

К единичному производству относятся изготовление экспериментальных образцов машин, крупных станков, мощных гидротурбин и электрогенераторов и т.д.

Серийным называется производство, в котором выпуск изделий осуществляется сериями (партиями). В зависимости от величины и повторяемости серий производство может быть мелкосерийным и крупносерийным.

В серийном производстве отдельные операции технологического процесса закреплены за определенным оборудованием. В основном используются станки с числовым программным управлением (ЧПУ), специализированные по методу обработки (токарные, зубообрабатывающие, шлифовальные), а также агрегатные и специальные станки. Переналадка станочного парка позволяет переходить от изготовления одной серии изделий к другой. Номенклатура изделий в серийном производстве ограничена.

В настоящее время существуют следующие рекомендации по выбору производственных структур серийного производства (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Число видов деталей	Серийность выпуска	Рекомендуемая структура
2...8	1500...15000	Переналаживаемые (гибкие) автоматические линии
4...100	40...2000	Участки станков с ЧПУ
40...500	25...600	Группы станков с ЧПУ
500 и более	До 30	Отдельные станки с ЧПУ

Серийное производство значительно экономичнее единичного, так как позволяет повысить производительность труда за счет специализации рабочих. Этот тип производства является наиболее распространенным в машиностроении, поскольку он лучше других отвечает требованиям рыночной экономики. В нем оптималь-

ным образом сочетаются высокая производительность и гибкость (рис. 1.4).

Рис. 1.4. Соотношение гибкости и производительности для серийного производства

К серийному типу производств относятся станкостроение, авиастроение, приборостроение и др.

Массовым называют такое производство, в котором изделия одного вида изготавливают непрерывно в течение продолжительного времени (обычно несколько лет).

К этому типу производства относятся автомобилестроение, производство предметов массового спроса и др. Для массового производства характерно выполнение на большинстве рабочих мест постоянно повторяющихся операций, что экономически оправдано при большой программе выпуска. Отсюда следует, что массовое производство объективно создает благоприятные условия для автоматизации технологических процессов. Поэтому массовое производство — это, как правило, автоматизированное производство, в котором технологические процессы выполняются на автоматических линиях. Функции рабочих сводятся к контролю работы линии и ее обслуживанию.

1.5.2. Методы производств

В машиностроении различают два метода изготовления деталей и сборки машин: непоточный и поточный.

Непоточным называют метод, при котором детали изготавливают партиями на каждой операции. Оборудование расставляют группами по технологическому признаку (токарная, фрезерная, сверлильная, шлифовальная группы и т.д.), без определенной связи с последовательностью выполнения операций. Сборку машин осуществляют также партиями на постоянных рабочих местах.

На рис. 1.5 показан процесс обработки подшипниковых колец в непоточном производстве. Сначала партия колец проходит токарную обработку в группе токарных автоматов и затем поступает на термическую обработку. После нее кольца обрабатываются на шлифовальных станках и наконец поступают на сборку подшипников.

Поточным называется метод производства, при котором операции технологического процесса обработки или сборки закреплены за определенным оборудованием, которое расположено в порядке выполнения операций, а объект производства передается с одной операции на другую при помощи транспортировочных

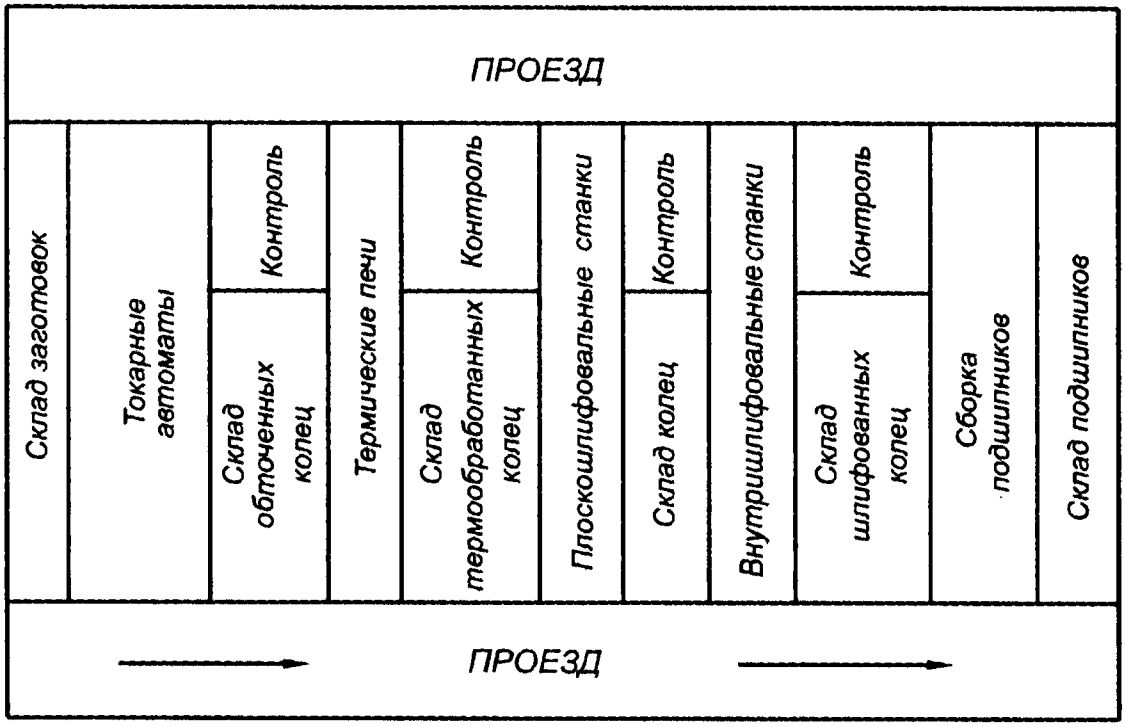


Рис. 1.5. Схема планировки оборудования в непоточном производстве

устройств. Такой метод позволяет производить обработку или сборку без заделов непрерывным потоком.

Основой поточного производства является поточная линия (рис. 1.6), на которой оборудование работает синхронно. Поточной линии свойственна ритмичность выпуска изделий, характе-

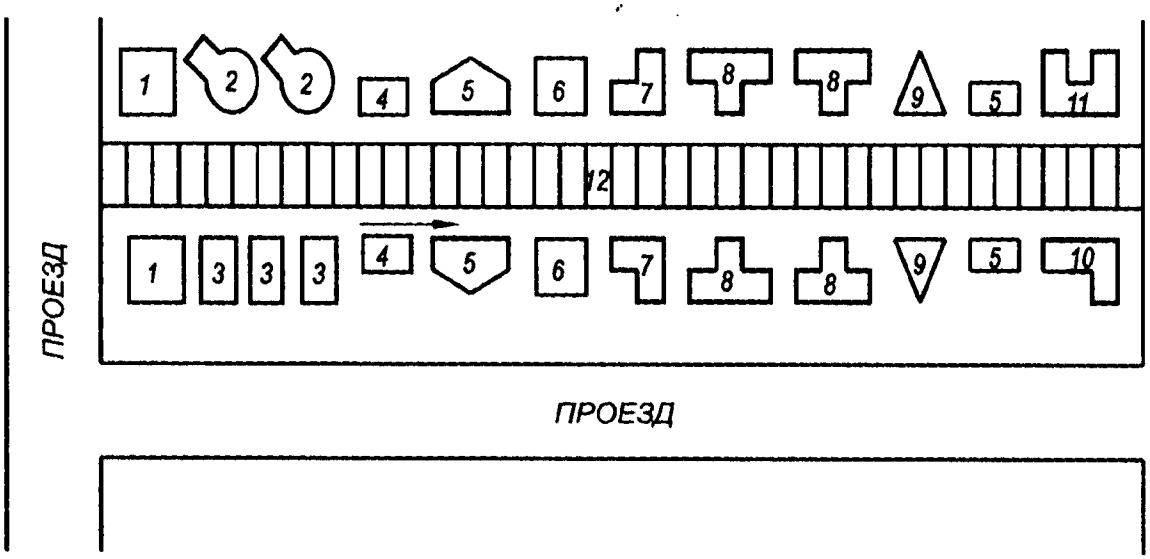


Рис. 1.6. Схема поточной линии для обработки подшипниковых колец: *1* — тара для заготовок; *2* — токарные станки для обработки внутренних колец; *3* — токарные станки для обработки наружных колец; *4* — технический контроль; *5* — термическая печь; *6* — плоскошлифовальный станок; *7* — бесцентрово-шлифовальный станок; *8* — внутришлифовальный станок; *9* — доводочный станок; *10* — сборка подшипников; *11* — установка; *12* — транспортер

ризуемая определенным промежутком времени, называемым *тактом*. Расчетная величина такта τ определяется отношением

$$\tau = \Phi/N,$$

где Φ — фонд рабочего времени; N — число деталей, выпущенных изделий за тот же период времени Φ.

Поточное производство экономически более эффективно, чем непоточное. Закрепление за оборудованием и рабочими одних и тех же операций позволяет использовать высокопроизводительное оборудование, а также снизить трудоемкость и себестоимость процесса. Характерные для непоточного производства дополнительные транспортные и складские операции, которые требуют рабочих, оборудования и площадей, в поточном производстве ликвидируются.

1.5.3. Концентрация и дифференциация технологического процесса

Одну и ту же заготовку можно обрабатывать технологическими процессами с разным количеством и содержанием операций. Если процесс раздроблен на простейшие (элементарные) операции, состоящие из одного перехода или прохода, то он называется дифференцированным технологическим процессом. *Дифференциация* делает процесс более простым, надежным и менее дорогостоящим. Поэтому дифференцированные процессы иногда применяются при запуске (освоении) производства, недостаточном его оснащении и отсутствии квалифицированных рабочих.

Концентрация технологического процесса представляет собой совмещение на одном рабочем месте достаточно большого числа переходов или позиций. Концентрация в первую очередь направлена на уменьшение станкоемкости и сокращение числа рабочих. На практике применяют параллельную, последовательную и смешанную формы концентрации технологического процесса.

Параллельная форма концентрации имеет место, когда поверхность заготовки обрабатывается параллельно несколькими инструментами (рис. 1.7) или комбинированным инструментом. К параллельной форме концентрации также относится многопозиционная обработка на агрегатных станках и автоматических линиях. При последовательной форме концентрации одним инструментом последовательно обрабатывается совокупность поверхностей заготовки (рис. 1.8), например на станке с ЧПУ или на копировальном станке. Смешанная форма концентрации показана на примере обработки торца вала комбинированным инструментом (рис. 1.9), в котором вначале последовательно обрабатываются поверхности *2* и *3*, а затем параллельно поверхности *1*, *2*, *3* и *4*.

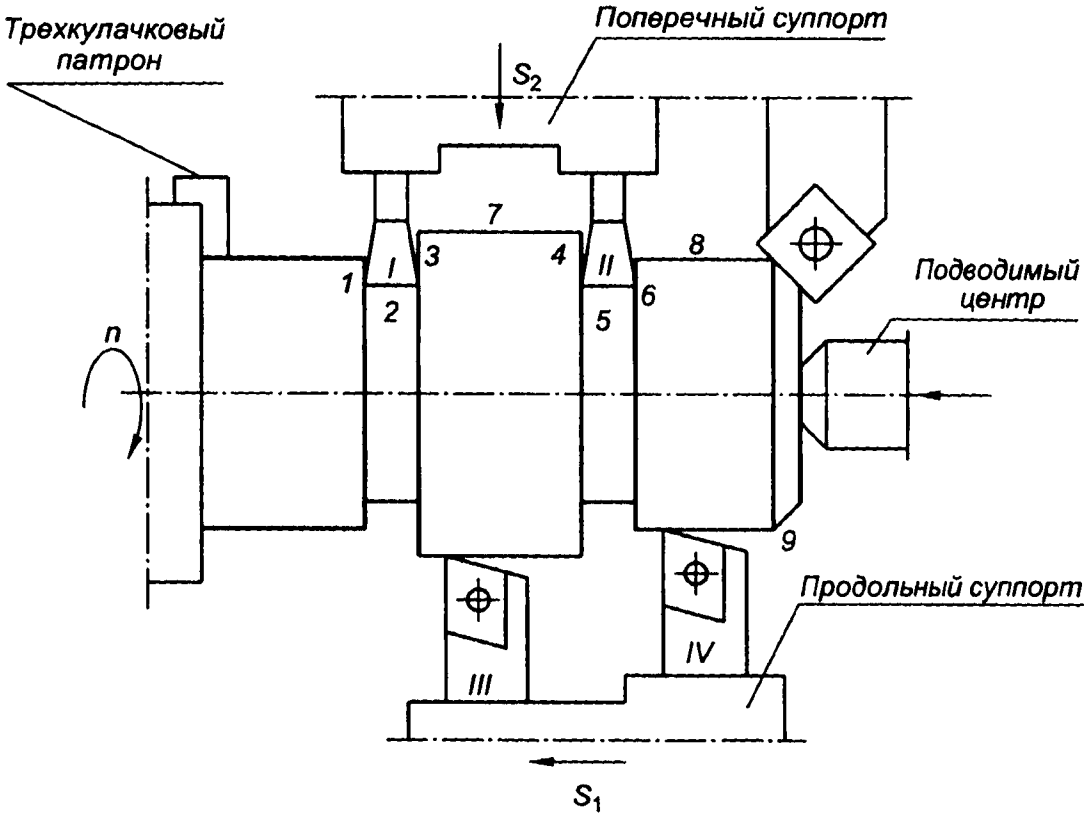


Рис. 1.7. Параллельная концентрация операции токарной обработки вала: *1—9* — параллельно обрабатываемые поверхности вала; *I—IV* — обрабатывающие инструменты; S_1 и S_2 — подача суппортов; *n* — вращение вала

Эффективность применения концентрации зависит от ее степени. Различают несколько степеней концентрации технологических процессов.

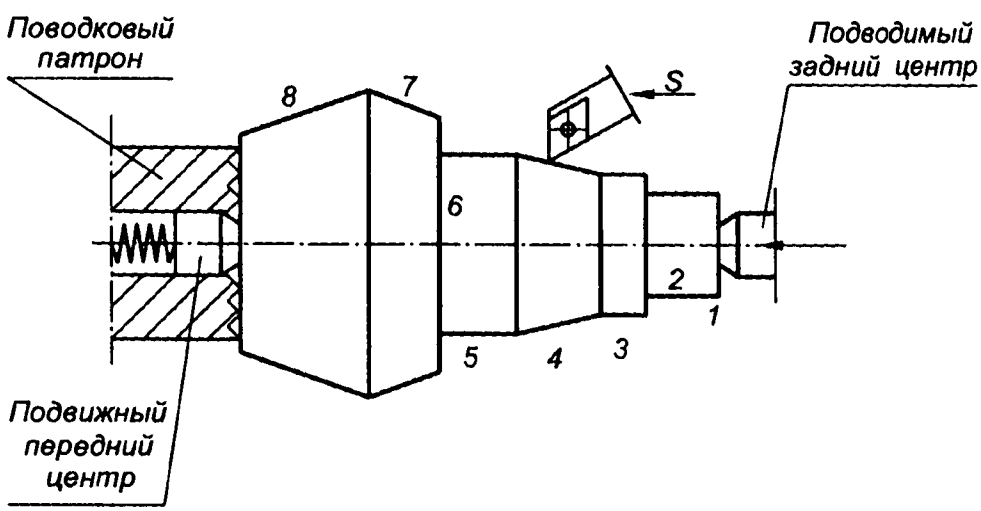


Рис. 1.8. Последовательная концентрация операций токарной обработки заготовки под коническую шестерню на станке с ЧПУ:
1—8 — последовательно обрабатываемые поверхности заготовки; *S* — подача инструмента

Допустим, что технологический процесс состоит из k простейших операций, каждая из которых выполняется на отдельном станке (рис. 1.10, *а*). Тогда станкоемкость процесса будет складываться из станкоемкостей простейших операций (переходов):

$$T_д = t_1 + t_2 + \ldots + t_k = \sum_i^k t_i$$

или

$$T_д = k t_{ср},$$

где $t_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{k} t_i}{k}$ — средняя станкоемкость простейшей операции (перехода).

Очевидно, что число станков F в таком процессе равно k.

Первая степень концентрации соответствует случаю, когда технологический процесс выполняется на однопозиционных станках и на каждом станке объединены по m переходов (инструментов), например обработка на одношпиндельных многорезцовых автоматах или многошпиндельных однопозиционных станках (рис. 1.10, *б*). В этом случае станкоемкость процесса и число станков уменьшается в m раз:

$$T_д^{I} = \frac{k}{m} t_{ср} \text{ и } F^{I} = \frac{k}{m}.$$

Если технологический процесс выполняется на C многопозиционных станках и на каждой позиции объединены по m переходов (инструментов), то получим вторую степень концентрации. Допустим, что число позиций на каждом станке одинаково и равно n. Тогда станкоемкость процесса (число станков) сокращается в mn раз (рис. 1.10, *в*):

$$T_д^{II} = \frac{k}{mn} t_{ср} \text{ и } F^{II} = C = \frac{k}{mn}.$$

Ко второй степени концентрации относится также обработка на многопозиционной автоматической линии с жесткой связью между позициями, когда на позициях выполняются по несколько переходов (рис. 1.10, *г*).

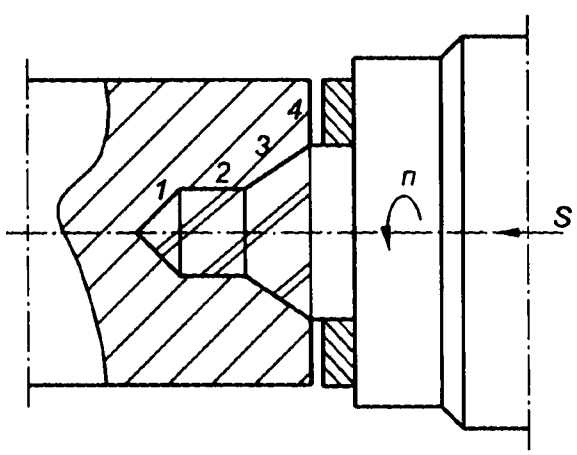


Рис. 1.9. Смешанная концентрация операции заготовки и подрезки торца вала комбинированным инструментом:
1 — 4 — обрабатываемые поверхности; *n* — вращение вала; *S* — подача инструмента

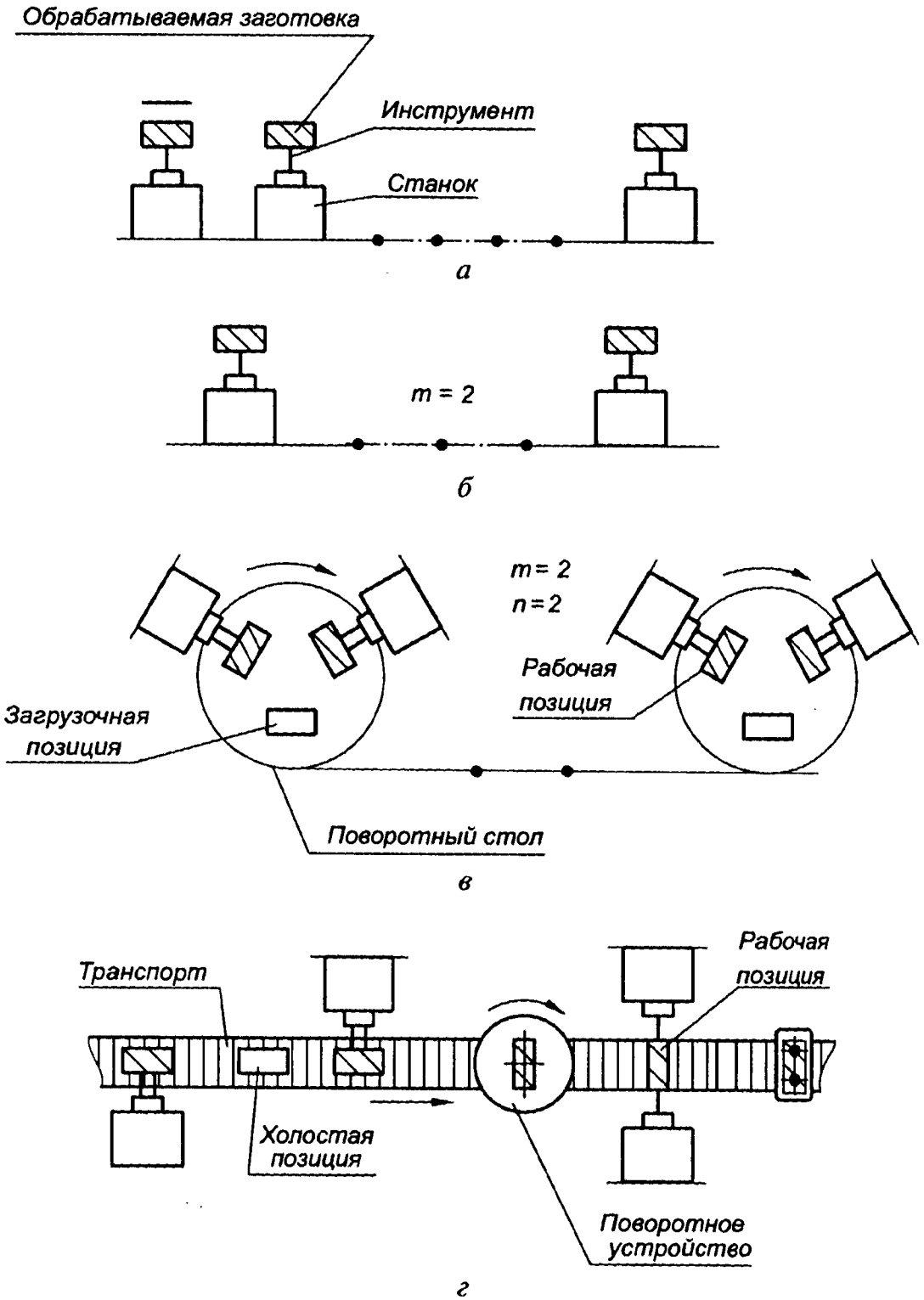


Рис. 1.10. Различные степени концентрации операций

Возможна и третья степень концентрации технологического процесса. Она имеет место при объединении N многопозиционных станков или участков линии в одну общую автоматическую линию. В этом случае станкоемкость процесса сокращается до минимума:

$$T_{\text{д}}^{\text{III}} = \frac{k}{mnC}\, t_{\text{ср}}.$$

Если представить, что все переходы на линии выполняются одновременно, т.е. $mnC = k$, то станкоемкость процесса приближается к станкоемкости одного перехода:

$$T_{\text{д}}^{\text{III}} \approx t_{\text{ср}} \text{ и } F^{\text{III}} = 1.$$

Таким образом, концентрация технологических процессов является эффективным средством сокращения станкоемкости и числа рабочих, что приводит к увеличению производительности труда. Поэтому концентрация технологических процессов рассматривается как одно из основных направлений автоматизации машиностроительного производства.

1.6. Выбор оптимального варианта концентрации технологических процессов

1.6.1. Критерии выбора

Концентрация технологических процессов приводит к следующим положительным результатам:

сокращается время обработки (сборки) и, следовательно, повышается производительность процесса;

уменьшается количество оборудования и требуется меньше производственных площадей;

сокращается число производственных рабочих, что положительно сказывается на производительности труда;

снижается себестоимость обработки (сборки) изделий при достаточно больших программах их выпуска;

создаются благоприятные условия для автоматизации технологических процессов или отдельных изделий.

Вместе с тем концентрация технологических процессов сопровождается отрицательными факторами, которые ограничивают ее применение. Основные из них следующие:

усложняется конструкция оборудования и возрастает его стоимость;

снижается надежность работы оборудования, увеличивается время простоев оборудования из-за устранения отказов механизмов при смене и наладке инструментов;

увеличиваются финансовые затраты на обслуживание оборудования, так как требуется более высокая квалификация наладчиков.

Поэтому в каждом конкретном случае проектирования процессов концентрация имеет свои рациональные пределы. Выбор

варианта концентрации должен быть обоснован по технико-экономическим показателям. Здесь применяются три критерия:

- фактическая станкоемкость обработки одной детали;
- себестоимость процесса;
- приведенные капитальные затраты или срок их окупаемости.

Фактическая станкоемкость в отличие от технологической станкоемкости $T_д$ определяется с учетом двух ограничений: простоев на смену инструментов $\sum \bar{t}_{с.и}$ и простоев на устранение отказов оборудования $\sum \bar{t}_{рем}$, отнесенных к одной детали. Знак суммы означает, что суммируются все простои за год:

$$T_д^ф = T_д + \sum \bar{t}_{с.и} + \sum \bar{t}_{рем}.$$

Фактическая станкоемкость $T_д^ф$ характеризует производительность процесса Q:

$$Q = \frac{60\,Ф}{T_д^ф}\eta_{пл},$$

где Ф — годовой фонд рабочего времени; $\eta_{пл}$ — коэффициент плановых простоев оборудования на ремонт и профилактику.

Измеряется фактическая станкоемкость в минутах.

Как было показано выше, технологическая станкоемкость зависит от степени концентрации процесса. Эту зависимость можно представить в виде

$$T_д = \frac{k}{x}\,t_{ср},$$

где $T_д$ — станкоемкость обработки детали при концентрации процесса x; k — число простейших операций (переходов), на которые можно разбить данный процесс ($x = m$ — для однопозиционного станка с m инструментами (переходами); $x = mn$ — для многопозиционного станка с n позициями и в среднем с m инструментами на каждой позиции; $x = mnC$ — для автоматической линии и многопозиционных станков или участков); $t_{ср}$ — средняя продолжительность простейшей операции (перехода).

Суммарное время за год на смену инструментов, отнесенное к одной детали, складывается по всем инструментам станка:

$$\sum \bar{t}_{с.и} = \sum \sum_{i=1}^{m} \frac{t_i}{Q_i},$$

где t_i — время на замену i-го инструмента; Q_i — число деталей, обработанных i-м инструментом за период его стойкости (штучная стойкость инструмента — это время непрерывной работы инструмента до его плановой смены).

С увеличением числа инструментов на станке (линии) их приходится чаще менять, так как в связи с перегревом и вибрациями стойкость каждого инструмента уменьшается. В итоге функция $\sum \bar{t}_{с.и}(x)$, отражающая зависимость времени простоев на замену инструментов от степени концентрации процесса, возрастает (рис. 1.11).

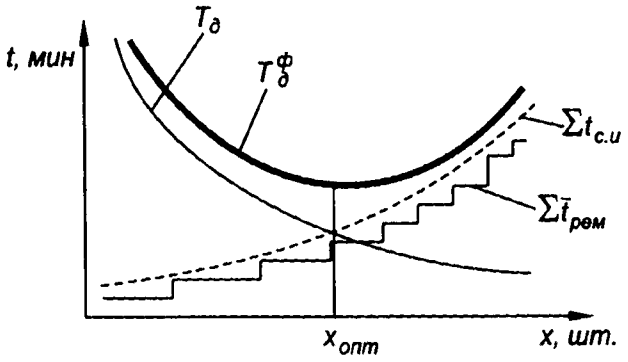


Рис. 1.11. Выбор варианта концентрации по критерию $T_д^ф$

Для определения $\sum \bar{t}_{рем}$ вводится понятие *удельной длительности восстановления B*. Удельная длительность восстановления — это отношение суммарного времени простоев оборудования, затрачиваемого на устранение отказов, к общему времени работы оборудования:

$$B = \frac{\sum \bar{t}_{рем}}{\sum t_{раб}}.$$

Если это отношение привести к одной детали, то получим

$$B = \frac{\sum \bar{t}_{рем}}{\sum \bar{t}_{ср}} \text{ или } \sum \bar{t}_{рем} = Bt_{ср}.$$

Удельная длительность восстановления является важным параметром надежности оборудования. На основании многочисленных наблюдений и исследований, проведенных российскими учеными А. П. Владзиевским, Е. С. Дымшицем и А. И. Дащенко, значения этого параметра систематизированы.

С увеличением концентрации технологического процесса надежность оборудования снижается, число отказов возрастает и оборудование больше простаивает на ремонте, о чем свидетельствует график $\sum \bar{t}_{рем}(x)$ на рис. 1.11. Ступенчатый характер этого графика объясняется тем, что в определенных интервалах изменения x конструкция станка не усложняется и его надежность не меняется.

Технологическая станкоемкость с повышением концентрации процесса постоянно уменьшается, что во многом объясняет снижение фактической станкоемкости $T_д^ф$. Однако существует значение $x_{опт}$, при котором дальнейшее увеличение концентрации не приводит к снижению $T_д^ф$. Напротив, в этом случае простои оборудования и инструментов становятся более значительными и фактическая станкоемкость возрастает. Значение $x_{опт}$ ограничивает зону вариан-

тов концентрации технологического процесса с наибольшей производительностью.

Критерий *себестоимости процесса* характеризует текущие затраты на обработку детали. Этот критерий определяется по формуле технологической себестоимости

$$C = M + З + \alpha \frac{A}{N} + \frac{И}{N}.$$

Здесь M — стоимость заготовки; З — заработная плата рабочих, занятых обработкой детали; $З = (\gamma + \beta) a T$, где γ — накладные расходы; β — начисления на заработную плату; a — тарифная минутная ставка (стоимость одной минуты работы); α — коэффициент амортизационных отчислений (определяется из расчета срока амортизации в 7 лет: $\alpha = 1/7 = 0{,}143$); A — стоимость оборудования и оснастки, руб.; И — стоимость инструмента; N — годовой выпуск деталей.

Расходы на заработную плату рабочих определяются трудоемкостью обработки

$$T = 60 \frac{f}{Q},$$

где f — число рабочих; Q — выпуск деталей в час (производительность процесса).

С увеличением концентрации процесса число рабочих сокращается, а деталей выпускается больше. Следовательно, расходы на заработную плату уменьшаются. Но вместе с тем с концентрацией процесса возрастает стоимость оборудования и инструмента. Поэтому зависимость $C(x)$, представленная на рис. 1.12, также имеет оптимальный вариант концентрации $x_{опт_C}$ с минимальной себестоимостью обработки.

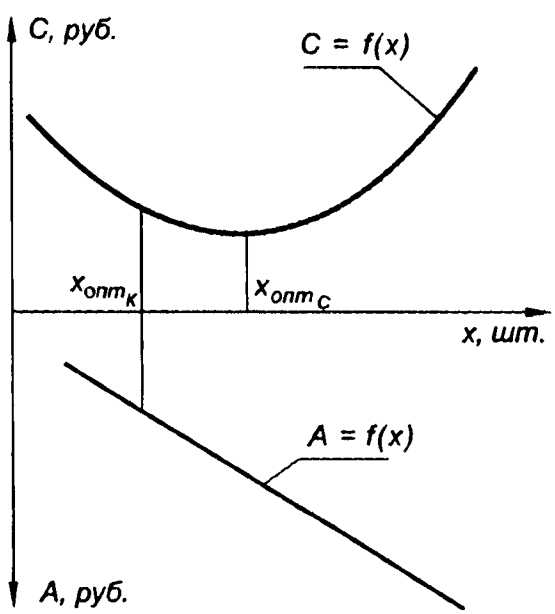


Рис. 1.12. Выбор варианта концентрации по критериям «С» и «К»

Еще один критерий — *приведенные капитальные затраты* (К) — характеризует единовременные капитальные затраты на одну обработанную деталь с учетом ее себестоимости:

$$К = C + E_N \frac{A}{N},$$

где E_N — коэффициент эффективности капитальных затрат, определяемый сроком их окупаемости:

$$E_N = 1/P,$$

где P — срок окупаемости капитальных затрат (единица измерения — годы).

При использовании этого критерия на основе данных по стоимости оборудования строится зависимость $A(x)$, которая суммируется с зависимостью $C(x)$. Вариант, при котором сумма ординат этих зависимостей наименьшая, имеет минимальный срок окупаемости и считается оптимальным по критерию «приведенные капитальные затраты».

Практикой автоматизации машиностроительного производства определены следующие рекомендации по применению критериев выбора вариантов концентрации технологических процессов.

Критерии $T_д^Ф$ и С следует применять, когда концентрация и автоматизация осуществляются на базе действующего оборудования и не связаны с большими капитальными затратами. Если создаются новые процессы обработки (сборки) и необходима закупка дорогостоящего оборудования, то более значимыми становятся критерии К или P.

1.6.2. Методы выбора варианта концентрации

На практике применяют два метода выбора варианта концентрации технологических процессов. Первый — это *метод перебора*, при котором возможные варианты процессов сравниваются по одному, двум или трем критериям. Этот метод требует трудоемких расчетов. Их точность низка, так как варианты не имеют глубокой проработки.

Метод перебора оправдывает себя, когда необходимо быстро и приблизительно оценить два-три варианта процессов по одному из критериев.

Более совершенным является второй метод выбора варианта концентрации технологических процессов — *метод направленного поиска*. Он применяется, когда создается новое производство, сравнивается много вариантов, каждый из которых связан с большими капитальными затратами. Сущность метода направленного поиска состоит в следующем (рис. 1.13).

Возможные варианты технологических процессов с различной концентрацией операций последовательно располагают на схеме в порядке нарастания концентрации. Разбивают на три группы. Из каждой группы выбираются представители, например варианты с наибольшей концентрацией в группе — *5*, *10*, *14*. Представители групп вариантов сравниваются между собой по приведенным капитальным затратам $К_і$. Представитель с минимальными затратами определяет группу вариантов, среди которых находится оптимальный, т.е. определяет группу поиска. Остальные две группы вариантов из дальнейшего рассмотрения исключаются. На этом заканчивается первый этап поиска.

Допустим, что оптимальной оказалась *II* группа вариантов, чей представитель *10* показал минимальные затраты $К_{і\min}$ на первом этапе поиска.

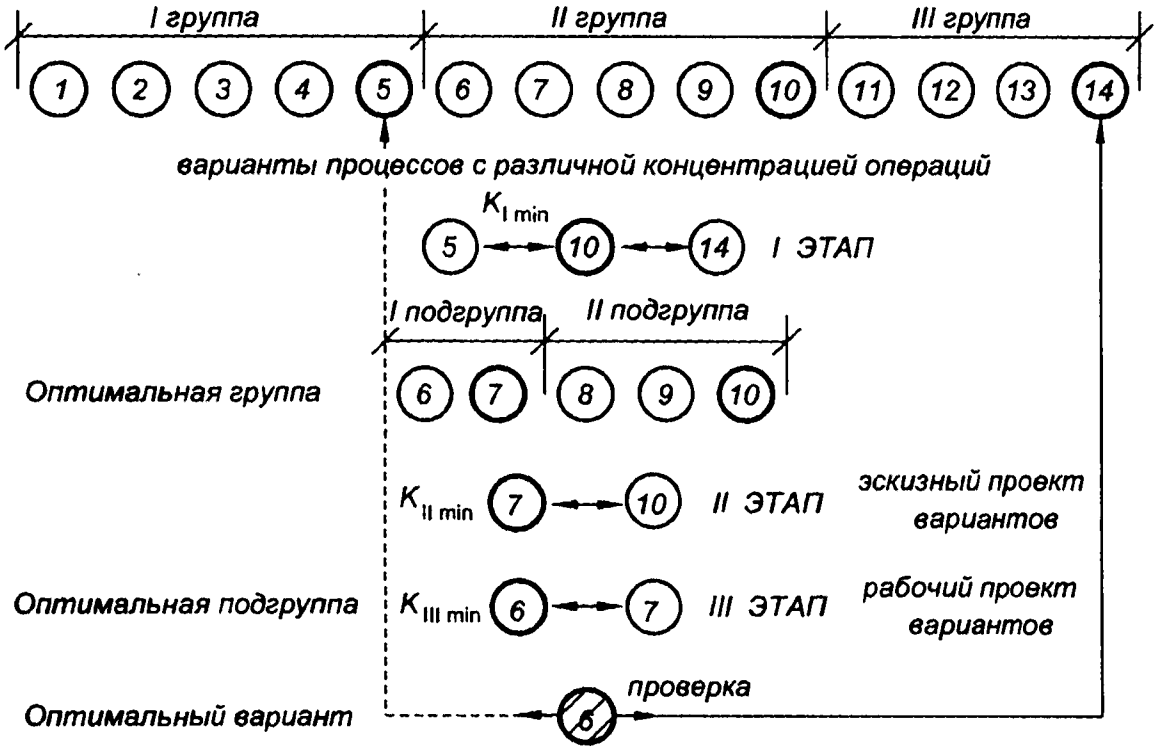


Рис. 1.13. Метод направленного поиска

На втором этапе оптимальная группа разбивается на две подгруппы. Из каждой подгруппы назначаются представители, например варианты *7* и *10*, которые сравниваются между собой по приведенным капитальным затратам K_{II}.

В отличие от первого этапа на втором для каждого представителя разрабатываются схемы компоновок оборудования, учитываются факторы не только его стоимости, но и надежности работы. Поэтому капитальные затраты на втором этапе определяются по более сложным зависимостям и возрастают по сравнению с первым этапом, т.е. $K_{IImin} > K_{Imin}$.

Допустим, оптимальной подгруппой оказалась *I подгруппа* вариантов. Это означает, что на третьем этапе поиск следует продолжить среди вариантов *I подгруппы*. Поскольку таких вариантов два (*6* и *7*), они сравниваются между собой по приведенным капитальным затратам K_{III}.

На третьем этапе поиска для конкурирующих вариантов стараются учесть как можно больше факторов, влияющих на затраты. В этом случае схемы компоновки и оборудования включают конструктивную проработку вариантов, а иногда дело доходит до рабочих проектов. Число факторов увеличивается и затраты возрастают: $K_{IIImin} > K_{IImin}$.

Допустим, оптимальным оказался вариант *6*. Если окончательная стоимость варианта *6* в результате уточнений на этапах поиска возросла настолько, что превысила затраты вариантов *5* и *14* на

первом этапе, то варианты *6, 5* и *14* для проверки сравниваются между собой по всем этапам. Это связано с тем, что степень прироста затрат у разных вариантов различна. На этом поиск заканчивается.

Метод направленного поиска имеет низкую трудоемкость и высокое качество, так как большая часть вариантов исключается из рассмотрения уже на первом этапе, и оптимальный вариант определяется с проработкой на уровне рабочего или эскизного проекта. Метод был разработан в 1970-е годы и применен для оптимизации компоновочных схем агрегатного оборудования профессором МГТУ «МАМИ» А. И. Дащенко.

В настоящее время метод направленного поиска находит широкое применение в машиностроении, особенно после его освоения на ЭВМ.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных этапов состоит производственный процесс?
2. Что такое технологический процесс? Из каких элементов состоит технологический процесс механообработки деталей?
3. Какая часть технологической операции называется позицией?
4. Что такое трудоемкость и станкоемкость технологического процесса?
5. Назовите признаки классификации технологических процессов. Что свойственно различным типам производств?
6. Как строится поточное производство? Чем оно отличается от непоточного?
7. Что такое концентрация технологических процессов механообработки деталей?
8. Почему концентрация технологических процессов рассматривается как одно из направлений автоматизации производства машин?
9. Чем обусловлена задача определения оптимального варианта концентрации технологических процессов?
10. По каким критериям и какими методами осуществляется выбор оптимального варианта концентрации технологических процессов?

ГЛАВА 2
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

2.1. Роль и значение автоматизации

В последние десятилетия автоматизация производственных процессов остается одним из главных направлений развития машиностроения. Эффективность автоматизации проявляется прежде всего в росте производительности труда. Производительность П труда представляет собой выпуск изделий в единицу времени, приходящийся на одного работающего:

$$П = Q/f,$$

где Q — число изделий, выпускаемых в единицу времени (производительность процесса); f — число работающих, занятых производством изделия.

Например, технологический процесс механической обработки деталей автомобиля имеет производительность $Q = 60$ шт./ч. В процессе принимают участие 10 рабочих. Тогда производительность труда при таком процессе составит шесть изделий в час.

Рост производительности труда в автоматизированном производстве по сравнению с неавтоматизированным достигается за счет двух основных факторов:

- сокращения численности работающих. В автоматизированном производстве значительная часть функций рабочих, техников, инженеров выполняется машинами;
- сокращения продолжительности рабочих циклов выпуска изделий.

Рабочим циклом называется повторяющийся отрезок времени, в течение которого в технологическом процессе осуществляется выпуск одного изделия. В поточно-массовом производстве рабочий цикл $t_ц$ состоит из времени рабочих $t_{р.х}$ и холостых $t_{х.х}$ ходов:

$$t_ц = t_{р.х} + t_{х.х}.$$

Рабочие ходы не зависят от степени автоматизации и выполняются технологическими машинами (станками, прессами, стендами). В течение рабочих ходов происходит снятие стружки, ок-

раска, штамповка, запрессовка подшипников и т.д. Время рабочих ходов зависит от методов и режимов их выполнения. Этим занимается технология машиностроения.

Холостые ходы представляют собой вспомогательные движения, которые подготавливают выполнение рабочих ходов. К ним относятся установка и снятие деталей на станках, транспортировка, контроль, подналадка оборудования и другие действия, которые в автоматизированном производстве выполняются машинами без рабочих, и поэтому на их выполнение затрачивается меньше времени, чем в неавтоматизированном производстве.

За время холостых ходов не производится продукция, поэтому они и называются холостыми. Однако без них невозможно выполнить рабочие ходы. Вот почему холостые ходы оказывают влияние на производительность и входят в состав рабочего цикла.

Сокращение времени рабочего цикла приводит к уменьшению времени производства каждого объекта и, следовательно, снижаются трудоемкость и себестоимость изготовления продукции. В этом состоит главное значение автоматизации. Кроме того, в автоматизированном производстве стабилизируется качество выпускаемой продукции, повышается ритмичность ее выпуска, так как уменьшается влияние на производство субъективных факторов. Автоматизированное производство предъявляет более высокие требования к квалификации рабочего персонала и способствует ее росту. С повышением уровня автоматизации улучшаются условия труда (комфортность, безопасность), он становится более интеллектуальным.

2.2. Автоматизация производственных и технологических процессов

В основе понятия автоматизации производственных процессов лежит замена физического и умственного труда человека машинным трудом. Чтобы эта замена была экономически эффективной, необходимо создание:

- технологичных конструкций изделий;
- технологических процессов, оптимальных с точки зрения производительности и себестоимости;
- условий технологического обеспечения качества выпускаемой продукции;
- надежных и безопасных устройств автоматизации холостых ходов рабочего цикла.

Поэтому понятие автоматизации производственных процессов включает комплекс мероприятий, направленных на сокращение числа работающих в целях повышения эффективности производства, качества продукции и улучшения условий труда. Очевидно, что автоматизация технологических процессов представляет собой создание технологий с минимальным участием людей.

2.3. Уровни автоматизации производственных процессов

Автоматизация производственных процессов может осуществляться на разных уровнях.

Автоматизация имеет так называемый нулевой уровень, если в производстве участие человека исключается только при выполнении рабочих ходов (вращение шпинделя, движение подачи инструментов и др.). Такую автоматизацию назвали механизацией. Можно сказать, что механизация — это автоматизация рабочих ходов. Отсюда следует, что автоматизация предусматривает механизацию.

Автоматизация первого уровня ограничивается созданием устройств, цель применения которых — исключить участие человека при выполнении холостых ходов на отдельно взятом оборудовании. Такая автоматизация называется автоматизацией рабочего цикла в серийном и поточном производстве.

Холостые ходы в норме штучного времени, определяющем трудоемкость операции, учитываются в виде вспомогательного времени $t_в$ и времени технического обслуживания $t_{т.об}$:

$$t = \overbrace{t_о}^{\text{механизация}} + \overbrace{t_в + t_{т.об}}^{\text{автоматизация 1 уровня}} + t_{орг} + t_{отд},$$

где $t_о$ — основное время, которое учитывает время рабочих ходов, $t_о = t_{р.х}$; $t_в$ — вспомогательное время, включает отвод и подвод инструмента, загрузку оборудования и контроль; $t_{т.об}$ — время технического обслуживания, затрачиваемое на смену инструмента, наладку оборудования, устранение отходов и управление; $t_{орг}$ — время обслуживания оборудования; $t_{отд}$ — время отдыха рабочего.

На первом уровне автоматизации рабочие машины еще не связаны между собой автоматической связью. Поэтому транспортировка и контроль объекта производства выполняются с участием человека. На этом уровне создаются и применяются станки-автоматы и полуавтоматы. На автоматах рабочий цикл выполняется и повторяется без участия человека. На полуавтоматах для выполнения и повторения рабочего цикла требуется участие человека.

Например, современный токарный многошпиндельный автомат выполняет обтачивание, сверление, зенкерование, развертывание и нарезание резьбы на заготовке из прутка. Такой автомат может заменить до 10 универсальных станков за счет автоматизации и совмещения холостых и рабочих ходов, высокой концентрации операций.

Автоматизация второго уровня — это автоматизация технологических процессов. На этом уровне решаются задачи автоматиза-

ции транспортировки, контроля объекта производства, удаления отходов и управления системами машин. В качестве технологического оборудования создаются и применяются автоматические линии, гибкие производственные системы (ГПС).

Автоматической линией называют автоматически действующую систему машин, установленных в технологической последовательности и объединенных средствами транспортировки, загрузки, контроля, управления и устранения отходов. Например, линия по обработке ведущей конической шестерни редуктора автомобиля высвобождает до 20 рабочих и окупается через три года при соответствующей программе выпуска.

Автоматическая линия состоит из технологического оборудования, которое компонуется под определенный вид транспорта и связывается с ним устройствами загрузки (манипуляторами, лотками, подъемниками). Линия включает кроме рабочих позиций и холостые позиции, которые необходимы для осмотра и обслуживания линии (рис. 2.1).

Если линия включает позиции с участием человека, то она называется автоматизированной.

Третий уровень автоматизации — комплексная автоматизация, которая охватывает все этапы и звенья производственного

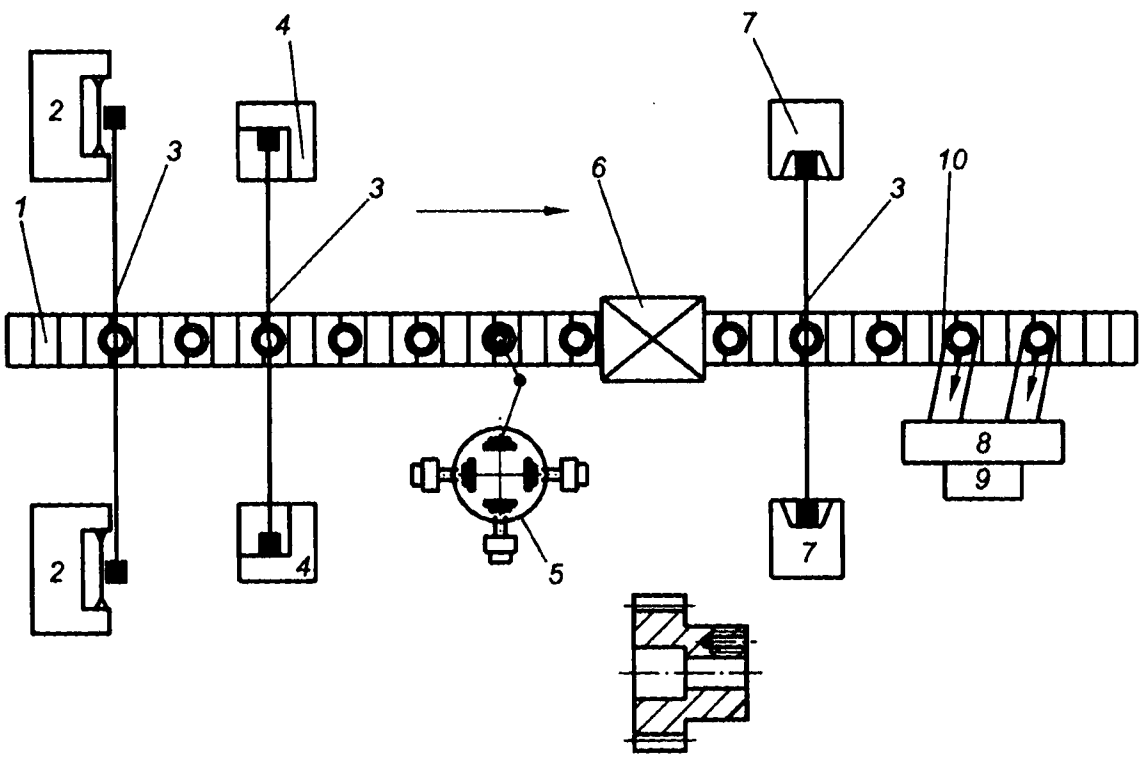


Рис. 2.1. Автоматическая линия механической обработки зубчатого колеса: *1* — пластинчатый транспортер; *2* — токарный станок; *3* — портальный манипулятор; *4* — зубообрабатывающий станок; *5* — агрегатный станок; *6* — моечная установка; *7* — шлифовальный станок; *8* — контрольная станция; *9* — емкость для бракованных деталей; *10* — лоток

процесса, начиная от заготовительных процессов и заканчивая испытаниями и отправкой готовых изделий. Комплексная автоматизация требует освоения всех предшествующих уровней автоматизации. Она связана с высокой технической оснащенностью производства и большими капитальными затратами. Такая автоматизация эффективна при достаточно больших программах выпуска изделий стабильной конструкции и узкой номенклатуры (производство подшипников, отдельных агрегатов машин, элементов электрооборудования и др.).

Вместе с тем именно комплексная автоматизация позволяет обеспечить развитие производства в целом, так как имеет наибольшую эффективность капитальных затрат. Чтобы показать возможности такой автоматизации, рассмотрим в качестве примера автоматический завод по выпуску автомобильных рам в США. При выпуске до 10 000 рам в сутки завод имеет штат в 160 человек, который в основном состоит из инженеров и наладчиков. При работе без применения комплексной автоматизации для выполнения той же производственной программы понадобилось бы не менее 12 000 человек.

На третьем уровне автоматизации решаются задачи автоматизации складирования и межцеховой транспортировки изделий с автоматическим адресованием, переработки отходов и управления производством на базе широкого применения ЭВМ. На этом уровне участие человека сводится к обслуживанию оборудования и поддержанию его в рабочем состоянии.

2.4. Современные черты автоматизации производства машин

Автоматизация неразрывно связана с задачами производства, которые с течением времени меняются в зависимости от состояния экономики. В современных рыночных экономических условиях можно выделить следующие черты автоматизации машиностроения.

1. Автоматизация стала технологически более гибкой. Это связано со следующими факторами:

- происходит более быстрое моральное старение изделий;
- возрастает потребность в расширении круга модификаций машин;
- повышаются требования к качеству и надежности машин;
- увеличивается доля серийного и мелкосерийного производства машин.

Гибкое автоматизированное производство (ГАП) реализуется с помощью ГПС, которые создаются на базе станков с ЧПУ и с применением промышленных роботов (см. гл. 4).

2. Развитие автоматизации происходит на основе все более широкого внедрения микропроцессорной и компьютерной тех-

ники, особенно в системах управления и контроля. Использование компьютеров облегчает труд инженеров и наладчиков, повышает надежность управляющих систем и позволяет в большей степени использовать потенциальные возможности прогрессивных технологий.

3. Значительное внимание уделяется автоматизации сборочных и заготовительных процессов.

В машиностроении трудоемкость сборочных и заготовительных процессов составляет от 15 до 30 %, а степень автоматизации 15...20 % (в механообработке в отдельных отраслях машиностроения до 80 %). Сборочное производство многолюдно, в результате качество и производительность подвержены влиянию субъективных факторов. Объясняется это более сложными задачами, которые приходится решать при автоматизации сборки.

Необходимость автоматизации заготовительных процессов во многом связана с тяжелыми и вредными для здоровья человека условиями труда. В современных прессово-кузовных (листовых) производствах применяются автоматизированные линии изготовления кузовов автомобилей, кабин лифтов, их сварки и окраски.

2.5. Основные направления развития автоматизации производства

Технологической основой автоматизации является теория производительности, разработанная известным ученым Г.А. Шаумяном еще в 1930-е годы. В теории производительности устанавливаются связи между техническими и экономическими показателями автоматизации. Не раскрывая существа этих связей, отметим, что теория производительности позволила определить основные направления развития автоматизации производства, которые в настоящее время можно сформулировать следующим образом.

1. Повышение технологичности конструкции машин и их агрегатов.

2. Создание технологических процессов и оборудования с оптимальной концентрацией простейших операций.

3. Широкое применение автоматических (автоматизированных) линий и гибких производственных систем как основы автоматизации массового, серийного и мелкосерийного производства.

4. Автоматизация загрузки технологического оборудования, транспортировки и контроля объекта производства в технологических процессах, а также устранения отходов.

5. Автоматизация управления технологическими и производственными процессами.

2.5.1. Технологичность конструкций изделий и автоматизация производства

Автоматизация на любом уровне должна быть экономически обоснованной. Большое влияние на экономическую эффективность применения автоматизации оказывают два фактора:

- годовая программа выпуска;
- технологичность конструкции изделия и его элементов.

Чем больше программа выпуска, тем более благоприятные условия создаются для окупаемости затрат на автоматизацию и повышения экономической эффективности. Мощным средством увеличения программы выпуска является унификация элементов конструкции машин. Унификация как одна из форм стандартизации устанавливает минимальное количество видов и типоразмеров для элементов машин, обеспечивая их взаимозаменяемость и необходимое качество. Унифицированные детали, сборочные единицы и агрегаты используются в разных машинах. Например, крепежные детали, подшипники, зубчатые колеса, фильтры одинаковой конструкции применяются в разных автоматах.

В последние годы при решении задач автоматизации большое внимание уделяется технологичности конструкции машин. Под *технологичностью конструкции* понимают свойство изделий отвечать требованиям автоматизированного производства по выпуску изделий требуемого качества с минимальными затратами средств и времени. Основным показателем технологичности является стоимость изготовления. Опыт показывает, что 75 % стоимости изготовления изделия обусловлено его конструкцией, а при автоматизированной сборке эта зависимость доходит до 90 %.

Чем технологичнее конструкция изделия, тем меньше трудоемкость и стоимость изготовления, тем быстрее окупятся затраты на автоматизацию.

Различают технологичность деталей и сборочных единиц (агрегатов). Технологичность деталей рассматривают с позиций их изготовления и сборки агрегатов.

Технологичность детали с позиции ее изготовления определяется следующими основными факторами:

- материалом, массой, техническими требованиями;
- способом получения заготовки;
- типом детали (вал, диск, рычаг, корпус, зубчатое колесо), ее конфигурацией, симметричностью и устойчивостью конструкции;
- наличием труднообрабатываемых поверхностей, например поверхностей со сложным профилем, глубокими отверстиями небольшого диаметра и т. д.

С позиций автоматической сборки факторы технологичности деталей несколько другие. Автоматическая сборка в общем

виде включает подачу деталей в зону сборки, ориентацию и соединение.

Наиболее сложным элементом для автоматизации является ориентация деталей в зоне сборки. Различают несколько степеней автоматической ориентации деталей.

Нулевую степень ориентации имеют детали, которые в ней не нуждаются, например шарики подшипников качения (рис. 2.2, *а*).

Первая степень ориентации ($n_{ст} = 1$) характерна для деталей, у которых имеется одна ось симметрии *X* и одна плоскость симметрии *YZ* (рис. 2.2, *б*). Для ориентации таких деталей требуется только одно движение — поворот детали относительно координатной оси *Y*.

Вторая степень ориентации ($n_{ст} = 2$) соответствует деталям с одной осью симметрии *X*. Для ориентации таких деталей требуется два движения — поворот относительно координатной оси *Y* и поворот относительно координатной оси *Z* (рис. 2.2, *в*). И, наконец, несимметричные детали имеют третью степень ориентации $n_{ст} = 3$ — три движения относительно координатных осей *Y*, *Z*, *X* (рис. 2.2, *г*).

Возможности автоматической ориентации оцениваются по критериям симметричности, устойчивости и сцепляемости. Главным из них является критерий симметричности $K_{см}$.

Для цилиндрических деталей $K_{см} = \frac{1}{n_{ст}}$. Следовательно, для деталей с первой степенью ориентации $K_{см} = 1$, со второй — $K_{см} = 0{,}5$ и с третьей — $K_{см} = 0{,}33$. Практика показывает, что если $K_{см} < 0{,}33$, то для автоматической ориентации не существует готовых решений.

Технически очень сложно осуществлять ориентацию корпусных деталей. Для этих деталей

$$K_{см} = 1 - \frac{N_{пол}}{2n_р},$$

где $N_{пол}$ — число различных положений, которые может принимать деталь при ее ориентации; $n_р$ — число различных ребер детали, определяющих ее положение.

Идеальным является случай, когда корпусная деталь имеет форму куба (рис. 2.2, *д*). Для такой детали

$$N_{пол} = 1,\ n_р = 1 \text{ и } K_{см} = 1 - \frac{1}{2 \cdot 1} = 0{,}5.$$

Что касается технологических сборочных единиц и агрегатов машин под автоматическую сборку, то опыт позволил сформулировать следующий ряд определяющих факторов.

1. Построение конструкции по блочному принципу позволяет существенно упростить конструкцию агрегата в целом и процесс

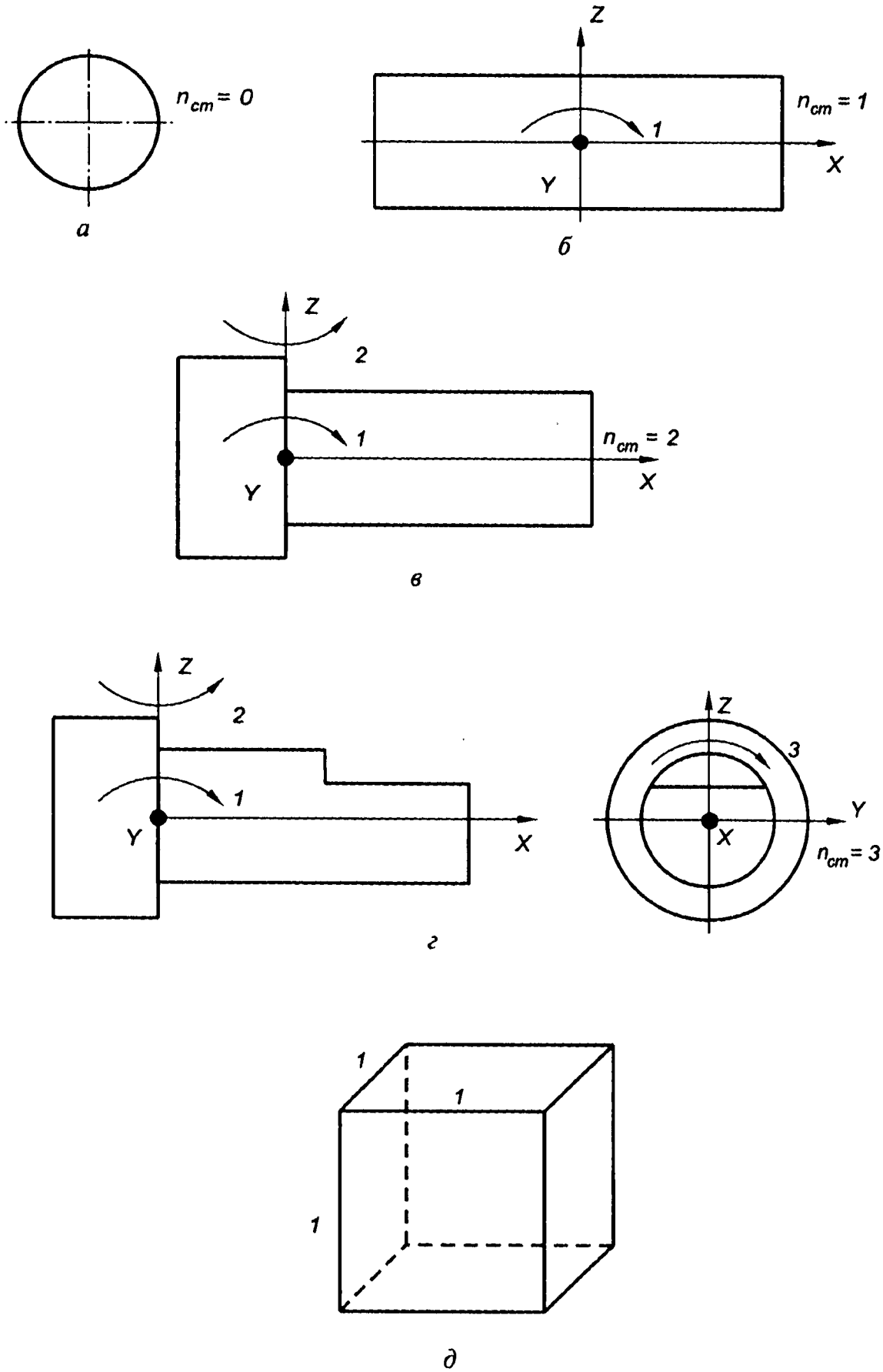


Рис. 2.2. Ступени ориентации детали и определение $K_{см}$

его сборки. Блоки можно собирать параллельно и подавать в технологической последовательности на общую сборку агрегата. На рис. 2.3 представлена в качестве примера автоматизированная линия сборки тормозного механизма переднего колеса автомобиля «Москвич 2141». Конструкция механизма состоит из двух блоков: поворотного кулака с подшипником и ступицы колеса с тормозным диском. Первый блок собирается на участке линии (позиции *2*, *3*, *4*). Второй блок собирается параллельно на многопозиционном сборочном автомате с поворотным столом. Затем на позициях линии *5*, *6*, *7* и *8* блоки соединяются, крепятся сопутствующие элементы конструкции и осуществляется контроль механизма. Позиция *1* служит для загрузки линии, а *9* — для выгрузки.

2. Число деталей в блоке не должно превышать 7—10. С увеличением числа деталей в блоке преимущества блочного принципа уменьшаются.

3. Возможность применения типового сборочного оборудования снижает капитальные затраты и сроки их окупаемости.

4. Число различных направлений сборочных технологических движений должно быть минимально. Желательно, чтобы все

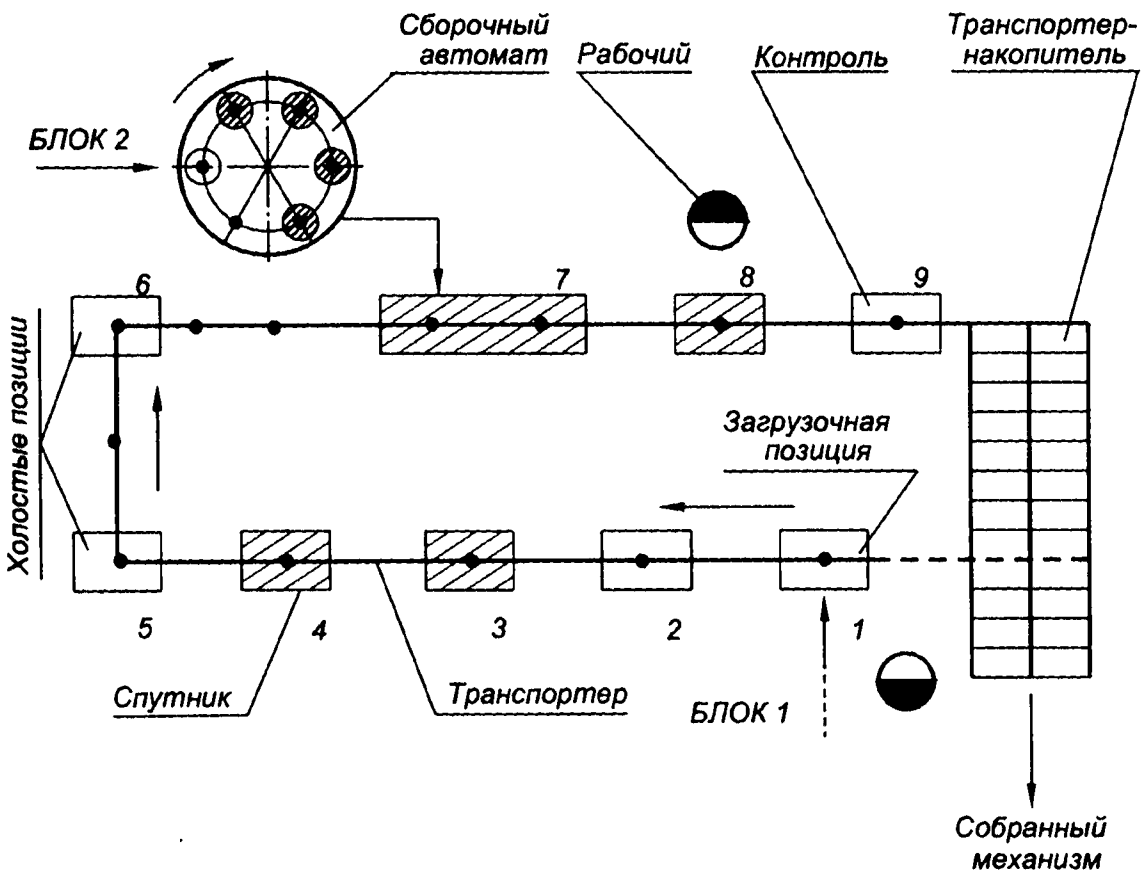


Рис. 2.3. Схема автоматизированной линии сборки механизма, конструкция которого построена по блочному принципу:
1 — 9 — позиции линии

движения сборки проводились в одном направлении, например сверху вниз. Особенно затрудняют автоматизацию движения под углом.

5. Необходима полная взаимозаменяемость деталей и элементов конструкции, поступающих на сборку, а также отсутствие регулировок. Наличие регулировок делает автоматизацию сборки практически невозможной.

Взаимозаменяемость является технологической основой автоматизации производства, когда детали агрегата изготавливаются независимо друг от друга. Это позволяет организовать процесс сборки агрегатов непрерывным потоком без регулировок и сортировок.

2.5.2. Типы автоматических линий

Рассмотрим классификации автоматических линий машиностроительного производства по различным признакам.

По технологическому признаку различают линии механообработки, сборки, сварки, окраски и т.д., а также комплексные линии. Последние включают позиции штамповки, механообработки, термообработки и сборки. Наиболее часто такие линии встречаются в подшипниковом производстве и при изготовлении деталей автомобилей.

По технологической гибкости линии бывают непереналаживаемые, для групповой обработки и гибкие. Линии для групповой обработки проектируются по условной детали, которая включает все элементы данной детали. Детали одной группы относятся к одному типу деталей (валы, диски, рычаги), имеют одинаковый технологический маршрут обработки и отличаются только размером поверхностей. Примером могут служить вилки карданных валов, промежуточные валы коробки передач, ступицы колес различных автомобилей.

Непереналаживаемые линии проектируются для обработки деталей с большой программой выпуска, конструкция которых не меняется длительное время (например, детали подшипников качения, изделия оборонной промышленности). Гибкие линии обладают возможностью переналадки для обработки однотипных хотя и различных деталей, имеющих одинаковый маршрут обработки.

Линии для групповой обработки характеризуются возможностью обработки двух-трех однотипных деталей без переналадки оснастки и оборудования.

По принципу работы линии разделяются на две группы. Первую группу представляют линии циклического действия. Для этих линий характерна периодичность перемещения объекта производства по линии и цикличность работы, когда все элементы цикла

(установка, обработка, снятие и транспортировка детали) выполняются последовательно один за другим, не перекрываясь по времени. Производительность линии циклического действия ограничивается из-за потерь на холостые ходы. Однако эти линии имеют большие технологические возможности, так как позволяют обрабатывать самые разнообразные детали и собирать разные агрегаты машин (двигатели, редукторы, фильтры и т.д.). Поэтому основной парк автоматических линий в машиностроении — это линии циклического действия.

Вторая группа линий по принципу действия — это линии непрерывного действия. В этих линиях объект производства перемещается непрерывно, и во время перемещения выполняются рабочие ходы. Таким образом сводятся к минимуму внутрицикловые потери и обеспечивается высокая производительность.

Линии непрерывного действия создаются на базе роторных машин, и их часто называют роторными линиями (рис. 2.4, *а*). Различают рабочие (технологические), загрузочные и транспортные роторы. Рабочий ротор (рис. 2.4, *б*) представляет собой непрерывно вращающийся стол *2*. По периферии стола *2* устанавливаются объекты производства *3*. Над столом *2* располагаются инструментальные блоки *1* в строгом соответствии с объектом производства. Инструментальные блоки *1* вращаются синхронно со столом *2* и в рабочей зоне ротора под действием неподвижного копира *4* получают технологические (рабочие) движения, в результате которых на рабочем роторе выполняются технологические операции.

Возможность разместить на одном рабочем роторе большое число инструментальных блоков, выполняющих одну и ту же операцию, позволяет линии работать с высокой степенью концентрации операций и, следовательно, с высокой производительностью.

Линии непрерывного действия компонуются из рабочих роторов, связанных между собой транспортными роторами. На каждом рабочем роторе выполняется одна операция. Объект производства последовательно перемещается от одного рабочего ротора к другому и таким образом проходит весь технологический процесс.

Производительность рабочего ротора определяется промежутком времени T_t между двумя выходами объектов с ротора:

$$Q = 1/T_t,$$

где $T_t = \frac{l}{v}$; l — расстояние между соседними инструментальными блоками; v — скорость перемещения инструментальных блоков.

Кроме высокой производительности роторные линии обладают еще одним важным достоинством. Они позволяют объединить операции с различной продолжительностью без изменения про-

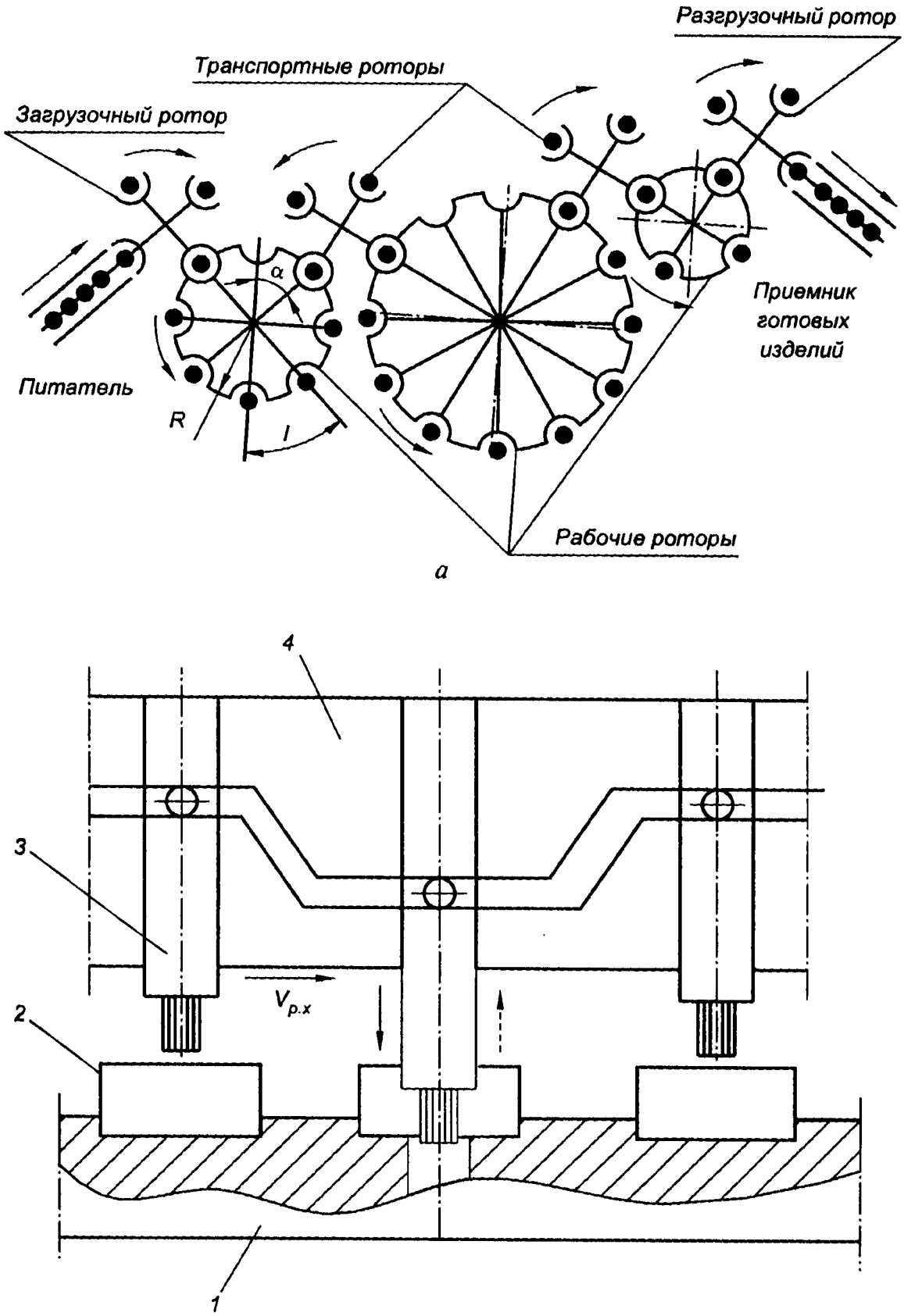


Рис. 2.4. Схема построения и работа роторной линии:
1 — инструментальные блоки; *2* — стол; *3* — объекты производства; *4* — копир

изводительности всей линии. При этом изменяются размеры рабочих роторов и число инструментальных блоков. Действительно,

$$l = 2\pi R\varphi,$$

где R — радиус рабочего ротора; φ — угол между соседними инструментальными блоками (рад).

Чем больше продолжительность операции, тем больше R и меньше φ. Таким образом, произведение $R\varphi$ может оставаться неизменным.

Вместе с тем роторные линии имеют ряд существенных недостатков, которые ограничивают область их применения. Основной недостаток связан с низкими технологическими возможностями этих линий. Инструментальные блоки совершают простые возвратно-поступательные движения, что позволяет выполнять только простейшие операции (прошивку, резку, дозировку, пайку и т.д.).

Так как число рабочих роторов определяется числом операций технологического процесса, роторные линии очень громоздкие и требуют достаточно больших производственных площадей.

Ограниченные технологические возможности роторных линий не позволяют применять их для обработки деталей сложной формы, больших размеров и с большим числом операций. Поэтому такие линии нашли в основном применение в пищевой, оборонной, электротехнической промышленности при изготовлении простых изделий без снятия стружки, методами штамповки, выдавливания, пайки, дозировки материала, для сборки и контроля, когда технологический процесс состоит из небольшого числа (до 8) простых операций.

По виду связи между позициями различают линии с жесткой и гибкой связью.

Отличительным признаком линии с жесткой связью является то, что объект производства непосредственно перемещается от одной позиции к другой. На рис. 2.5, *а* показана схема такой линии с шаговым транспортером. Штанга транспортера *2* совершает возвратно-поступательные движения и обеспечивает шаговое перемещение заготовок с помощью толкающих элементов («собачек») *5* по направляющим *4*. На рис. 2.5, *б* показана условная схема этой же линии, которой удобно пользоваться на практике.

Жесткая связь между позициями обусловливает согласованность по времени (синхронность) работы машин. Либо все заготовки одновременно обрабатываются, либо одновременно все транспортируются. Поэтому эти линии часто называют синхронными линиями.

Линии с жесткой связью компактны, просты в управлении, имеют низкую стоимость. Однако они эффективны, только если станкоемкость позиций примерно одинакова и число позиций небольшое (8...12). Основным недостатком линий с жесткой связью

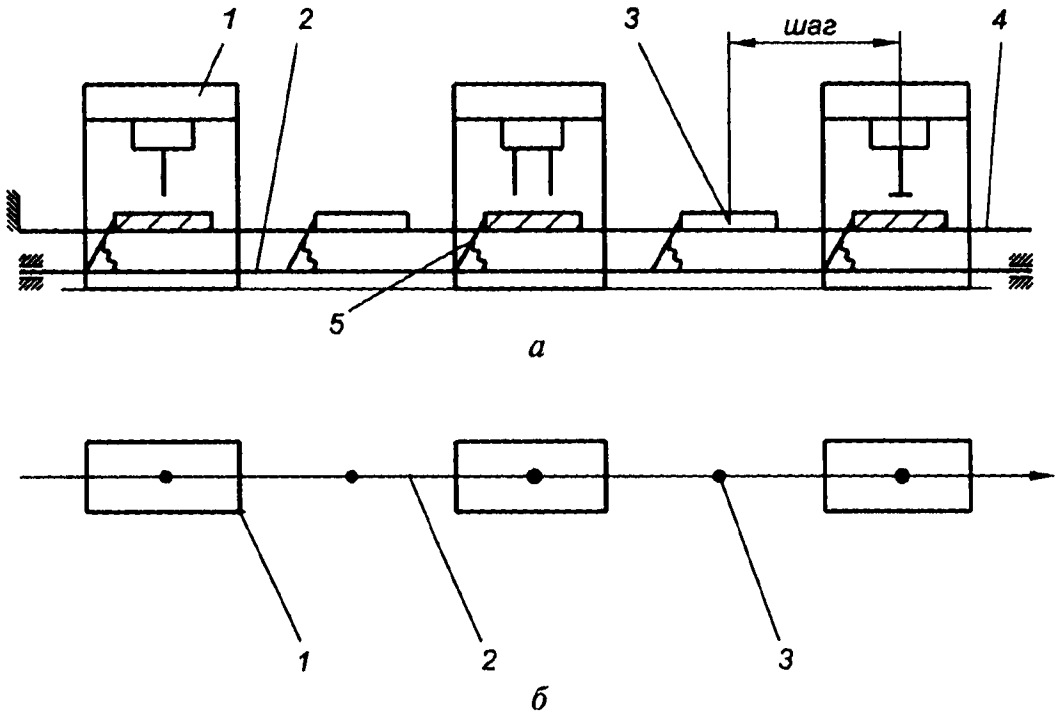


Рис. 2.5. Схема автоматической линии с жесткой связью:
1 — рабочая позиция; *2* — транспортер; *3* — холостая позиция; *4* — направляющая; *5* — толкающий элемент

является их низкая надежность, так как при отказе одной позиции простаивает вся линия. Это снижает ее производительность

$$Q = \frac{60}{t_{ц}} \eta_{т.и},$$

где $t_{ц}$ — время цикла в мин; $\eta_{т.и} = \dfrac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} B_i}$ — коэффициент технического использования линии; $B_i = \dfrac{\bar{t}_{пр\,i}}{t_{ц}}$ — удельная длительность простоев i-й позиции линии по техническим причинам; например, если $B_i = 0{,}002$, то на 1000 мин работы линии в среднем за год приходится 2 мин простоя по техническим причинам; n — число позиций линии; $\bar{t}_{пр\,i} = \dfrac{t_{пр\,i}}{N}$ — время простоев i-й позиции линии, отнесенное к одному циклу; $t_{пр\,i}$ — суммарное время простоев i-й позиции линии по техническим причинам за период наблюдения за линией (смену, неделю, месяц, год); N — число изделий, которое за время простоев могло бы сойти с линии.

Коэффициент технического использования $\eta_{т.и}$ характеризует техническое состояние и надежность линии. Если $\eta_{т.и} = 0{,}8$, то это

означает, что линия 20 % рабочего времени простаивает по техническим причинам (ремонт, техническое обслуживание).

Стремление повысить надежность линий привело к созданию линий с гибкой связью. Гибкость связи на линии достигается установкой накопителей между позициями или участками. Накопителями называют специальные устройства — емкости для размещения заготовок. Основное назначение накопителей — локализовать отказы, предотвратить остановку линии.

На рис. 2.6, *а* представлена схема линии, в которой накопители устанавливаются после каждой позиции, а на рис. 2.6, *б* — условная схема этой же линии. Применение накопителей делает работу соседних позиций на определенное время независимой. Емкость накопителя зависит от размеров заготовки, времени цикла и надежности соседних позиций (участков):

$$E_{ср} = K \frac{\bar{\tau}_в}{t_у},$$

где $E_{ср}$ — средняя емкость накопителя; K — коэффициент запаса, в зависимости от размеров заготовки принимающий значения 1,5...5,0; $\bar{\tau}_в$ — среднее время восстановления позиции (мин), определяемое опытным путем.

Обычно емкости накопителей обеспечивают бесперебойную работу линии в случае отказа в течение нескольких часов. Вместе с тем накопители существенно усложняют линию, повышают ее стоимость, требуют дополнительных производственных площадей. Поэтому экономически целесообразно устанавливать накопители между участками (рис. 2.7), которые образуют линии с комбинированной связью.

Деление линии на участки является важной задачей при ее проектировании, от решения которой зависит фактическая

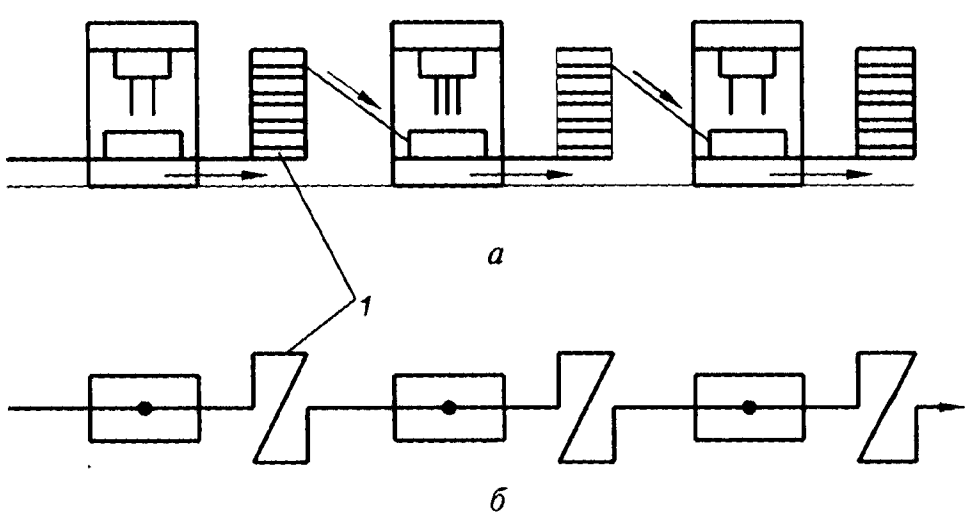


Рис. 2.6. Схема автоматической линии с гибкой связью:
1 — накопитель

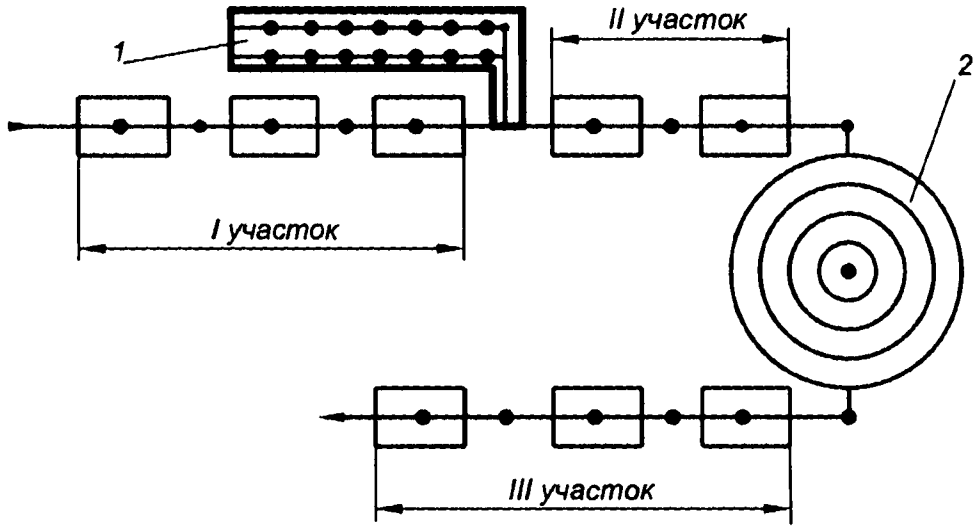


Рис. 2.7. Схема деления линии на участки с гибкой связью:
1 — тупиковый накопитель; *2* — сквозной накопитель

производительность и экономическая эффективность линии. Производительность линии, состоящей из m участков, определяется соотношением

$$Q = \frac{60}{t_{ц}} \eta_{т.и} = \frac{60}{t_{ц}} \frac{1}{1 + \frac{\sum_{j=1}^{m} Bj}{m} \gamma},$$

где $B_j = \sum_{i=1}^{n} B_i$ — удельная длительность простоев j-го участка линии по техническим причинам; n — число позиций j-го участка; $\gamma = 1{,}1 \ldots 1{,}5$ — коэффициент влияния простоев j-го участка на выпускающий участок. Зависит от емкости накопителя, количества и надежности участков.

Коэффициент влияния γ вводится в расчет производительности в связи с тем, что емкости накопителей ограничены и для устранения отказов требуется определенное время $\tau_в$. Практика эксплуатации автоматических линий и теория их надежности показывают, что наиболее эффективно делить линии на 2 — 3 участка. Дальнейшее увеличение m малоэффективно и может быть экономически неоправданным. При этом, чем ниже надежность линии, чем больше позиций она имеет, тем выше эффективность деления линии на участки (рис. 2.8).

По принципу действия и влиянию на работу линии различают накопители тупиковые и сквозные (см. рис. 2.7). *Тупиковый накопитель 1* работает на прием или выдачу заготовок только в случаях отказов соседних участков *I* и *II*. Тупиковые накопители обычно устанавливаются между участками с низкой надежностью, станкоемкости которых примерно одинаковы.

Сквозной накопитель 2 работает постоянно в режимах приема, выдачи, свободного пропуска заготовок. Помимо своей основной задачи этот накопитель может в определенной степени нивелировать различную станкоемкость соседних участков *II* и *III*. Сквозной накопитель также используют для изменения ориентации заготовок.

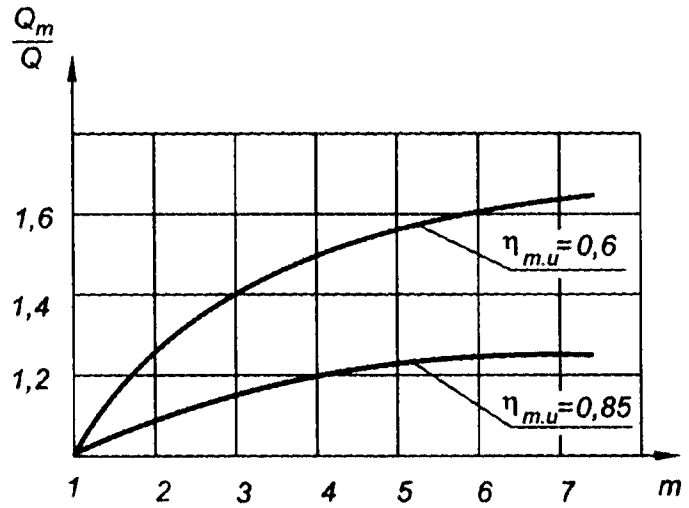


Рис. 2.8. Повышение производительности линии в зависимости от числа участков m и надежности линии $\eta_{т.и}$:
Q_m — производительность при $m > 1$; Q — производительность при $m = 1$

По способу базирования заготовок различают спутниковые и бесспутниковые линии.

Бесспутниковые линии позволяют обрабатывать заготовки, транспортировка, ориентация и установка которых на линии не вызывает технических трудностей. К таким заготовкам относятся валы, диски, которые имеют оси или плоскости симметрии и потому хорошо сохраняют устойчивость при транспортировке. На

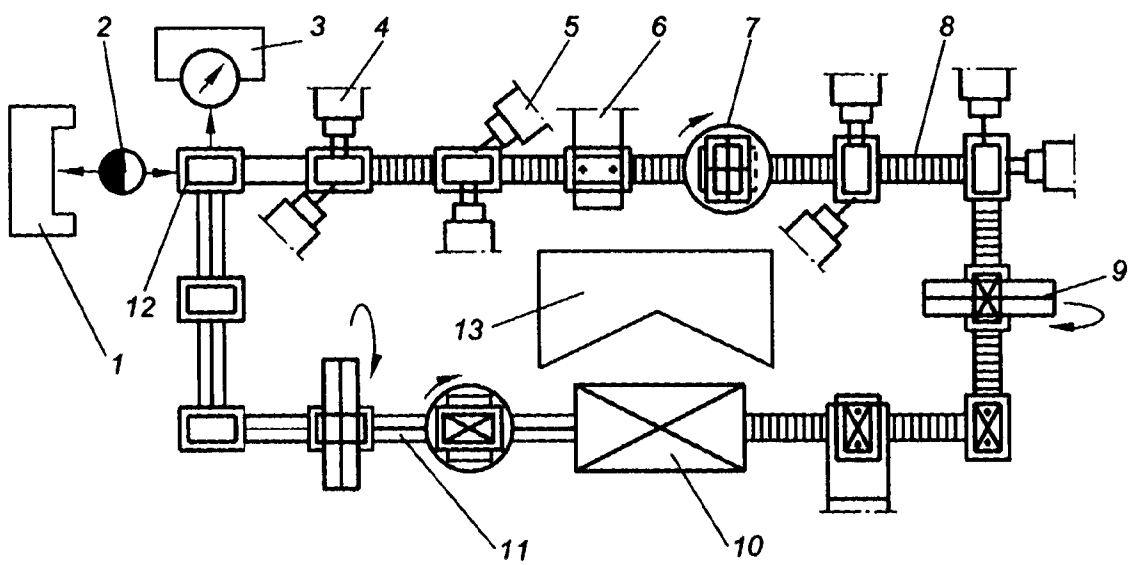


Рис. 2.9. Схема спутниковой линии из агрегатных станков с боковым расположением транспортера возврата спутников:
1 — станок для обработки базовых поверхностей; *2* — загрузочное устройство; *3* — контрольная машина; *4* — горизонтальная головка; *5* — угловая головка; *6* — верхняя головка; *7* — поворотное устройство; *8* — рабочий транспортер; *9* — опрокидывающее устройство; *10* — мойка; *11* — транспортер возврата спутников; *12* — загрузочная позиция; *13* — пульт управления

бесспутниковых линиях заготовки устанавливаются на станках в стационарные приспособления с помощью различных загрузочных устройств. Бесспутниковые линии могут быть с жесткой и гибкой связью, циклического и непрерывного действия, с боковым или верхним расположением транспорта.

Стремление автоматизировать обработку деталей сложной формы, неудобных для транспортировки и установки, привело к созданию *спутниковой линии* (рис. 2.9). На этих линиях заготовки устанавливаются в специальные приспособления — *спутники.* Спутник перемещается с заготовкой по всей линии, фиксируется и закрепляется вместе с заготовкой на рабочих позициях. При этом заготовка не меняет своего положения относительно спутника.

Спутниковые линии, как правило, работают с жесткой связью, имеют сквозное расположение транспорта и циклический принцип действия. На спутниковых линиях удобно и эффективно применять агрегатное технологическое оборудование. Агрегатное оборудование компактно, имеет высокую ремонтопригодность и позволяет вести обработку в различных направлениях (сверху, снизу, под углом) с высокой степенью концентрации операций. Основу агрегатного оборудования составляют силовые головки. На спутниковых линиях наибольшее применение находят силовые головки с гидравлическим механизмом подачи.

На рис. 2.10 показана схема гидравлической головки АМО «ЗиЛ». От электродвигателя *1* через ременную передачу *11* и редуктор *2*

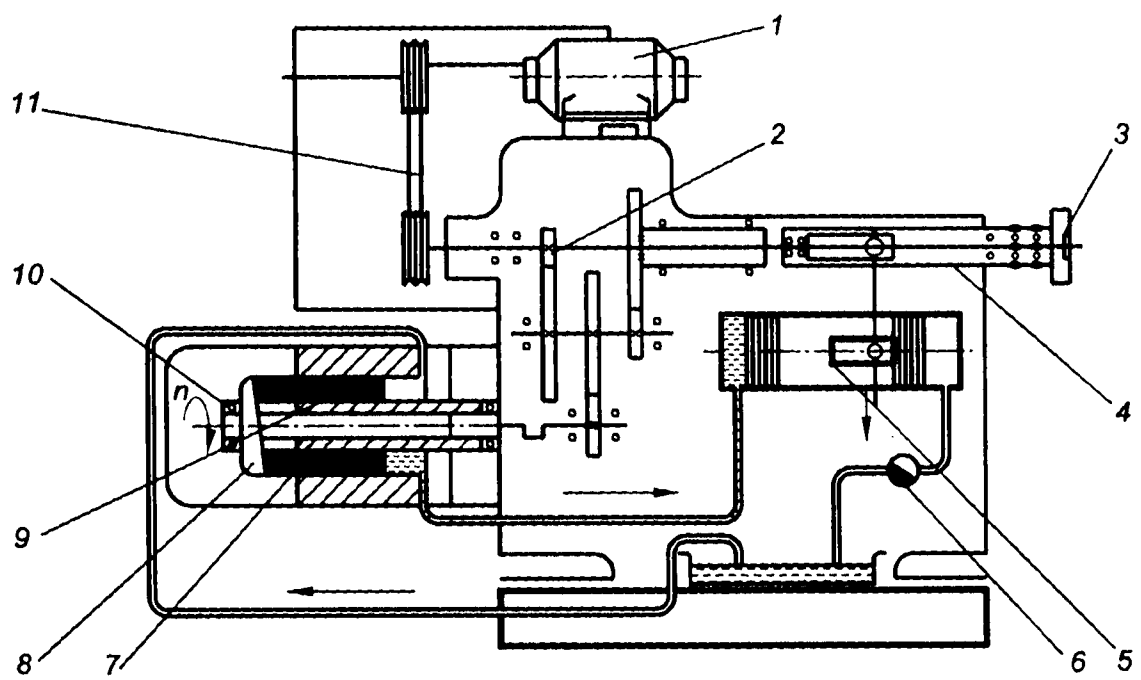


Рис. 2.10. Схема гидравлической силовой головки:
1 — электродвигатель; *2* — редуктор; *3* — шпиндель; *4* — пиноль; *5* — гидроцилиндр; *6* — дроссель; *7* и *9* — плунжер; *8* — плита; *10* — насос; *11* — ременная передача

вращение передается шпинделю *3*. Последний размещается внутри пиноли *4*, которая одновременно является штоком поршня гидроцилиндра *5* механизма подачи.

Привод подачи головки осуществляется от насоса *10* переменной производительности. Автоматическое изменение производительности насоса производится за счет изменения угла наклона качающейся плиты *8*, которая контактирует с плунжерами *7* и *9* насоса. Изменение угла поворота дросселя *6* регулирует давление масла под плунжерами, и тем самым задается производительность насоса в соответствии с необходимой величиной подачи пиноли со шпинделем.

Основным недостатком агрегатного оборудования является недостаточная жесткость силовых головок, что снижает их способность вести обработку с высокой точностью и большой мощностью. Низкая жесткость обусловлена большим количеством соединений (стыков) агрегатов при сборке оборудования. Поэтому агрегатное оборудование рекомендуется применять в основном на операциях сверления, развертывания, растачивания, нарезания резьбы отверстий небольшого диаметра, мелкого фрезерования, т.е. в тех случаях, когда не требуется больших усилий обработки.

Компоновка спутниковых линий во многом определяется способом возврата спутников на исходную позицию. Наиболее распространен вариант, при котором транспортер возврата спутников имеет боковое расположение относительно рабочего транспортера. Схему такой линии для обработки отверстий корпусной детали см. на рис. 2.9.

Схема с боковым расположением транспортера возврата спутников не имеет ограничений для установки оборудования, что дает возможность вести обработку детали в любых направлениях. Схема удобна для обслуживания, может применяться для крупных деталей и технологических процессов с большим числом позиций, например для обработки картеров мостов автомобилей, корпусов редукторов, блоков цилиндров двигателей и других деталей. Одним словом, схема имеет большие технологические возможности. Ее основной недостаток — потребность в больших производственных площадях.

Спутниковые линии, как правило, имеют сквозное расположение транспортера, когда транспортер проходит через рабочие зоны оборудования. В этом случае транспортер работает в более тяжелых условиях по сравнению с боковым или верхним расположением рабочего транспортера, так как находится под влиянием нагрузок, вибрации и отходов (стружки, охлаждающей жидкости, пыли, грязи). Поэтому сквозной транспортер должен отвечать повышенным требованиям эксплуатационной надежности.

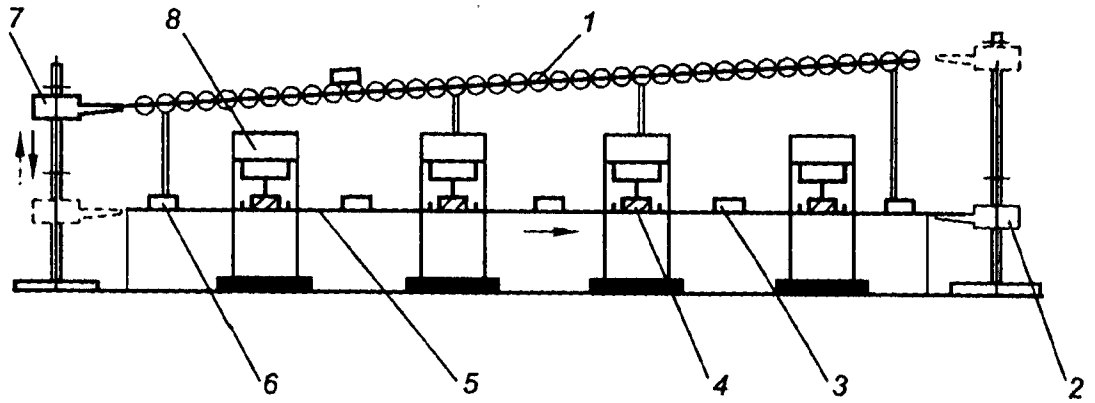


Рис. 2.11. Схема спутниковой линии с верхним расположением транспортера возврата спутников:
1 — транспортер возврата спутников; *2* и *7* — перегружатель; *3* — холостая позиция; *4* — рабочая позиция; *5* — рабочий транспортер; *6* — загрузочная позиция; *8* — станок

Помимо своей основной функции сквозной транспортер принимает участие в фиксации и закреплении спутников на рабочих позициях линии. Это существенно усложняет конструкцию транспортера, повышает его стоимость и ставит техническую задачу обеспечения точности установки спутников.

Способ с верхним расположением транспортера возврата спутников встречается значительно реже (рис. 2.11). После обработки на линии деталь вместе со спутником перегружателем *2* поднимается и выталкивается на транспортер возврата спутников *1*, который представляет собой наклонный рольганг. По рольгангу с помощью перегружателя *7* спутник опускается на позицию разгрузки-загрузки. На этой позиции готовая деталь снимается со спутника, а в спутник устанавливается очередная заготовка. Несмотря на экономию производственных площадей, такая схема крайне неудобна в обслуживании, громоздка для технологических процессов с большим числом позиций и вносит существенные ограничения в установку оборудования.

Схема спутниковой линии с нижним расположением транспортера возврата спутников наиболее компактна (рис. 2.12). Однако такое расположение транспортера возврата спутников предъявляет особые требования к конструкции корпуса станка, которые не всегда выполнимы. Кроме того, в этом случае транспортер возврата подвержен попаданию на него охлаждающей жидкости, стружки, масла и других производственных отходов, что снижает надежность транспортера и повышает его стоимость.

Поэтому для механообработки такая схема спутниковой линии применяется редко. В основном она применяется для сборочных процессов, где нет производственных отходов и спутники *7* можно изготовить в виде плоских палет (поддонов), удобных для нижней транспортировки под сборочными стендами *2*.

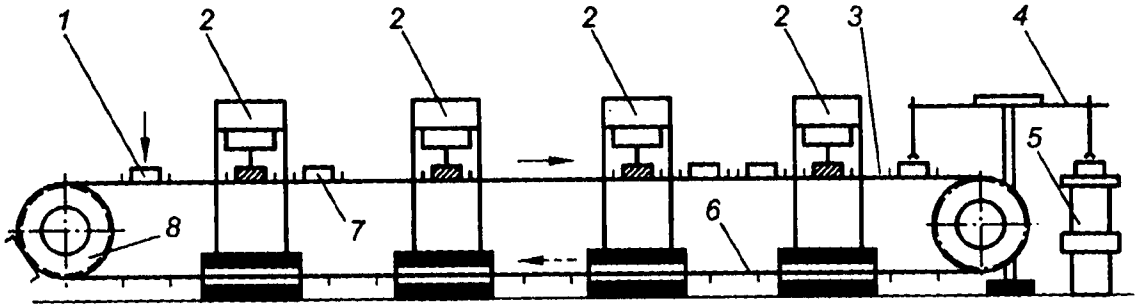


Рис. 2.12. Схема спутниковой линии с нижним расположением транспортера возврата спутников:

1 — загрузочная позиция; *2* — сборочный стенд; *3* — ленточный транспортер; *4* — манипулятор-перегружатель; *5* — отводящий транспортер; *6* — транспортер возврата спутников; *7* — спутник; *8* — ведущее колесо

Ленточный или пластинчатый транспортер *3* имеет принудительное постоянное перемещение от ведущего колеса *8*. При остановке палет в случаях, когда загружен сборочный стенд, рабочий транспортер проскальзывает относительно палет, создавая запас объектов сборки на линии.

При переходе на транспортер возврата палеты закрепляются на транспортере и перемещаются с ним как одно целое. Такое построение линии дает возможность сборочным стендам работать несинхронно, что очень важно.

Применение спутников значительно расширило круг деталей и агрегатов машин, которые стало возможным обрабатывать и собирать на автоматических линиях. Существенно упростилась установка заготовок на рабочих позициях линии. Появилась возможность создавать линии с замкнутым контуром и осуществлять загрузку и разгрузку линии на одной позиции. Это удобно и для автоматизации загрузочной позиции, и для обслуживания ее человеком.

В спутниковых линиях заготовки обрабатываются с одной установки от постоянных баз, это повышает точность обработки.

Вместе с тем спутниковые линии имеют ряд недостатков. Основной из них — более высокая стоимость. Спутники представляют собой сложные специальные приспособления. Количество спутников должно быть больше, чем рабочих позиций на линии. Для возврата спутников на исходную позицию требуется специальный транспортер.

Все это вызывает усложнение линии, повышает ее стоимость (около 40 %) и требует дополнительных производственных площадей. Кроме того, для установки на спутник требуется предварительная обработка у заготовки базовых поверхностей, которая обычно выполняется вне линии на специальном оборудовании. Это затрудняет автоматизацию всего технологического процесса обработки детали.

Контрольные вопросы

1. Какова роль автоматизации технологических процессов производстве машин?
2. В чем состоит комплексность понятия автоматизации технологических процессов?
3. Какие принято различать уровни автоматизации технологических процессов? Каковы их отличительные признаки?
4. Что называется автоматической линией?
5. Почему автоматизация развивается в направлении технологической гибкости и широкого применения ЭВМ?
6. Какие этапы производственного процесса наименее автоматизированы и почему?
7. Почему технологичность конструкции изделия рассматривается как одно из направлений развития автоматизации производства?
8. Какими факторами определяется технологичность конструкции детали с позиций механообработки и автоматической сборки?
9. Для каких деталей характерны три степени ориентации в зоне сборки?
10. Какими критериями оценивается сложность автоматической ориентации деталей?
11. Почему построение конструкции агрегата по блочному принципу и по принципу взаимозаменяемости деталей делает задачу автоматизации сборки агрегата более простой?
12. Назовите основные признаки, по которым различают автоматические линии.
13. Что характерно для линий циклического действия?
14. Какой отличительный признак характерен для линии непрерывного действия? Почему эти линии имеют высокую производительность?
15. Что влияет на продолжительность отдельной операции в роторных линиях?
16. Каковы области применения линий циклического и непрерывного действия?
17. Какой отличительный признак характерен для линий с жесткой связью? Почему эти линии имеют низкую надежность?
18. При каких условиях применение линий с жесткой связью эффективно?
19. С помощью каких устройств обеспечивается гибкая связь между участками линии?
20. Каким образом в линиях с гибкой связью учитывается влияние надежности работы составляющих участков на выпускающий участок?
21. От каких факторов зависит число участков линии?
22. Почему применяются спутниковые линии? Какое оборудование эффективно применять на этих линиях и почему?
23. Какие отрицательные факторы присущи спутниковым линиям?
24. Какие имеются виды спутниковых линий?

ГЛАВА 3
АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАШИН

3.1. Системы автоматического управления

Действия, непосредственно необходимые для выполнения некоторого процесса, называют *рабочими операциями.* Для правильного и качественного выполнения рабочих операций их необходимо сопровождать операциями управления, которые обеспечивают в нужные моменты начало, порядок следования и прекращение отдельных рабочих операций, задают правильные параметры процесса (например, направление и скорость перемещения инструмента), обеспечивают выполнение вспомогательных операций и т. д. Управляющие операции образуют *процесс управления.*

Замену труда человека в операциях управления работой автоматов называют *автоматизацией управления*, а технические устройства, выполняющие операции управления, — *автоматическими устройствами* или *средствами управления.* Весь комплекс технических средств (машин, станков, орудий труда), выполняющих данный технологический процесс, с точки зрения управления называется *объектом управления.* Совокупность средств управления и объекта управления — это *система управления.*

Система, в которой автоматизирована только часть операций, а другая их часть выполняется людьми, называется *автоматизированной системой.*

Система, в которой все рабочие и управляющие операции выполняют автоматические устройства без участия человека, называется *автоматической системой.*

В зависимости от назначения различают следующие автоматические системы:

- сигнализации, предназначенные для извещения обслуживающего персонала о состоянии той или иной технической установки, о протекании того или иного процесса;
- контроля без участия человека за различными параметрами и величинами, характеризующими работу какого-либо технического агрегата, или протеканием какого-либо процесса;
- блокировки и защиты для предотвращения аварийных ситуаций в технических установках;

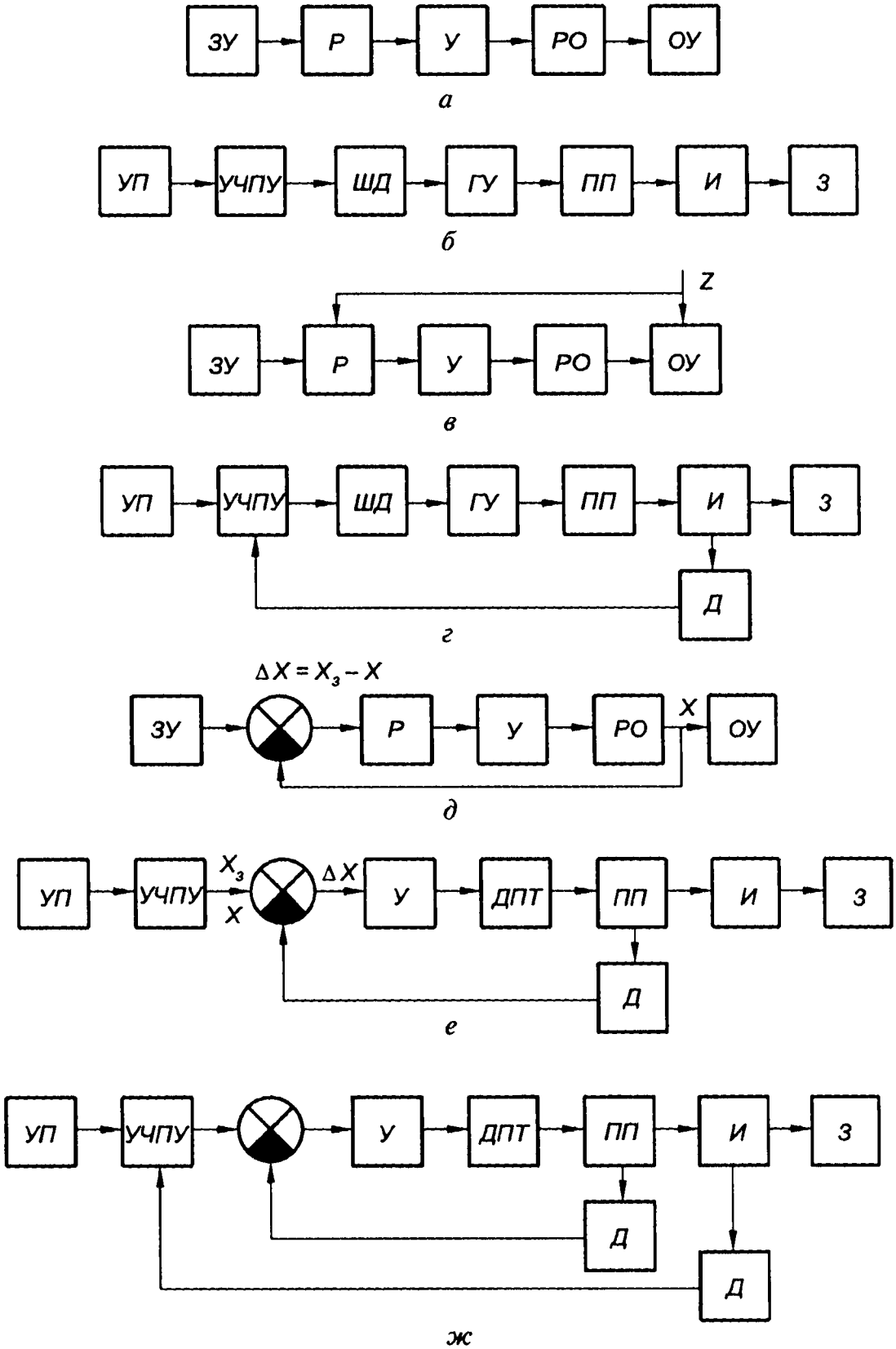


Рис. 3.1. Структура систем управления:
а — разомкнутая система; *б* — система с ЧПУ на базе шагового электродвигателя; *в* — система компенсации; *г* — система с ЧПУ с учетом износа инструмента; *д* — система с ООС; *е* — система с ЧПУ на базе электродвигателя постоянного тока; *ж* — адаптивная система с ЧПУ

• пуска и остановки для включения, остановки и реверса различных двигателей и приводов по заданной программе;

• управления различными процессами или работой технических агрегатов.

Важнейшими и наиболее сложными являются системы управления. Существует много признаков и классификаций систем автоматического управления; рассмотрим некоторые из них.

Системы можно разбить на две группы по способности реагировать на изменение условий, в которых должно производиться управление (температуры окружающей среды, напряжения в электросети, коэффициента трения в узлах объекта, износа резца при обработке). В системах первой группы используется *принцип разомкнутого управления*, когда требуемый закон изменения регулируемой величины обеспечивается непосредственно преобразованием сигнала от задающего устройства (рис. 3.1, *а*), а алгоритм управления не учитывает возмущающих воздействий на объект или изменения параметров самого объекта. Сигнал от задатчика *ЗУ* через регулятор *Р* и усилитель *У* поступает на регулирующий орган *РО*, воздействующий на объект управления *ОУ*. Так как всегда есть вероятность неожиданного изменения характеристик объекта или элементов системы, точность таких систем определяется стабильностью составляющих элементов.

На рис. 3.1, *б* приведена структурная схема системы с ЧПУ станка с приводом на базе шагового двигателя. По командам управляющей программы *УП* устройство *ЧПУ* (*УЧПУ*) выдает импульсы, вызывающие поворот ротора шагового двигателя *ШД* на некоторый угол. Гидроусилитель *ГУ* воспроизводит поворот ротора, но с большей мощностью, привод подач станка *ПП* перемещает режущий инструмент *И*, который воздействует на заготовку *З*. При работе системы не контролируется истинное положение рабочего органа, что упрощает систему, но снижает точность обработки. Схема имеет вид разомкнутой цепочки, что и определило название принципа.

Эти системы обладают предельным быстродействием, просты в изготовлении и эксплуатации, дешевы и надежны, поэтому широко распространены.

Разомкнутое управление типично для систем дискретного действия типа переключателей и их комбинаций (реле, логические элементы И, ИЛИ, НЕ). Такой сложнейший аппарат, как современная ЭВМ, работает по этому принципу: по командам программы данные из памяти поступают в процессор и обрабатываются в нем, результат передается обратно в память. Конечно, предусмотрен контроль правильности работы ЭВМ, но в случае сбоя выдается только сигнал остановки работы, как и в простейших устройствах автоматики.

Ко второй группе относятся системы, способные настраиваться на условия функционирования системы. Системы, основанные на *принципе компенсации* (*или управлении по возмущению*), контролируют возмущающие факторы и вносят коррективы в алгоритм управления (рис. 3.1, *в*). Следует подчеркнуть, что компенсировать можно только измеряемые возмущения. Сигнал от датчика, замеряющего возмущающий фактор Z, поступает на регулятор и корректирует управляющее воздействие таким образом, что влияние возмущения на объект управления компенсируется изменением управления.

Управление по возмущению нашло широкое применение в технике. Например, в хронометре используется биметаллическая пластина для компенсации температурного влияния, в схеме звукового усилителя низкой частоты применяется термосопротивление для обеспечения нормального режима работы полупроводников. Этот же принцип используется при автоматической коррекции настройки станка на размер по результатам замера износа инструмента (рис. 3.1, *г*).

Системы, работающие по принципу компенсации, просты, обладают высоким быстродействием, реагируют на некоторые возмущения. Однако их гибкость также невелика: они реагируют только на те возмущения, учет которых предусмотрен конструкцией системы.

Системы *автоматического регулирования* контролируют состояние регулируемого объекта и формируют управляющее воздействие по результатам сравнения требуемого $X_з$ и реального X значений регулируемого параметра (рис. 3.1, *д*).

На рис. 3.1, *е* приведена структурная схема замкнутой системы с ЧПУ с приводом на базе электродвигателя постоянного тока (*ДПТ*). Заданное *УЧПУ* положение рабочего органа сопоставляется в блоке сравнения с реальным положением, известным из показаний датчика обратной связи. Рассогласование усиливается усилителем *У* и передается на двигатель *Д*. Обычно чем больше рассогласование, тем больше крутящий момент, скорость вращения двигателя и подача. При приближении рабочего органа к заданному положению подача, пропорциональная рассогласованию, автоматически уменьшается, что обеспечивает точность позиционирования рабочего органа. Схема имеет вид замкнутой цепи и часто называется схемой *управления по замкнутому контуру.*

Значение выходного параметра передается обратно в начало схемы по так называемой *цепи обратной связи* (ОС). Так как при вычислении рассогласования ΔX значение выходного параметра X вычитается из заданного значения $X_з$, такая обратная связь называется *отрицательной* (ООС).

Схемы управления с ООС одинаково эффективны как для программного управления, так и для компенсации возмущений со

стороны окружающей среды. Недостатками систем с обратной связью является низкое быстродействие, опасность резонансных явлений и потери системой устойчивости (лавинообразного нарастания амплитуды внутренних колебаний в системе — например, вибраций), что ведет к разрушению регулируемого объекта.

В сложных системах типа современного станка с ЧПУ применяется *комбинированное управление*, сочетающее все три принципа управления и обеспечивающее быструю реакцию на основные возмущения и точное автоматическое регулирование независимо от причин, вызвавших отклонение.

Адаптивные системы способны при выработке управляющего воздействия дополнительно учитывать условия функционирования объекта. Так, в системе, представленной на рис. 3.1, *ж*, дополнительно контролируется сила или мощность резания, при превышении предельно допустимого значения автоматически снижается скорость резания или подача.

Самонастраивающиеся системы способны автоматически подбирать оптимальные значения своих параметров в процессе работы, что расширяет область устойчивости таких систем, особенно если во время их действия меняются параметры объекта управления.

Системы оптимального управления, *самоорганизующиеся системы* способны в процессе работы менять как свои параметры, так и структуру, и алгоритм работы.

Следует заметить, что только с использованием в системах управления дешевых и производительных микроЭВМ появилась реальная возможность построения интеллектуальных и гибких систем; изменение параметров, смена структуры и алгоритма управления выражаются в этом случае в переключении на выполнение другого фрагмента управляющей программы, хранящейся в памяти ЭВМ.

Хотя существуют сложные и дорогие системы, однако в производстве наиболее широко распространены простейшие.

Системы классифицируют и по виду алгоритма функционирования.

Системы программного управления призваны изменять управляемый параметр по заданному программой закону. Различают системы:

с *временной программой*, когда задатчик работает от часов, таймера (например, управление изменением во времени температуры в печи при термообработке деталей);

пространственной программой, когда требуется скоординированное перемещение по нескольким направлениям, а конкретные моменты осуществления определенных действий не имеют большого значения (например, при нарезании резьбы на токарном станке перемещение суппорта должно быть жестко привязано к вращению шпинделя).

Следящие системы предназначены для отслеживания (воспроизведения) некоторого непредсказуемого входного параметра и отличаются от систем программного управления тем, что вместо программного задатчика используется датчик отслеживаемого параметра. Примером такой системы является гидроусилитель, воспроизводящий поворот входного вала, но с большей мощностью.

Системы стабилизации предназначены для поддержания некоторого параметра в заданных пределах, например давления в гидросистеме станка.

Системами прямого регулирования называются системы, в которых чувствительный элемент воздействует непосредственно на рабочий орган, осуществляющий воздействие на объект. Примером таких систем является механическая копировальная система. Сила воздействия на рабочий орган, как правило, ограничена, воздействие объекта управления на чувствительный элемент снижает его чувствительность.

В *системах непрямого регулирования* для перемещения рабочего органа используется дополнительный источник энергии, обычно электроэнергия, энергия жидкости под давлением или энергия сжатого газа. Чувствительный элемент вырабатывает сигнал, который усиливается и преобразуется в системе регулирования и управляет мощным исполнительным устройством, воздействующим на рабочий орган. Эти системы применяются в случаях, когда требуется высокая точность позиционирования рабочего органа в сочетании с большой мощностью, необходимой для воздействия на него.

Системы управления делят также на *непрерывные* и *дискретные* (*цифровые*).

Процессы в реальном техническом объекте протекают обычно непрерывно по времени. Типичные датчики вырабатывают сигнал также непрерывно. Если в системе (см. рис. 3.1, *д*) все остальные части — регулятор (электронный блок), усилитель (электронный блок), исполнительное устройство (электродвигатель), преобразователь (механический редуктор) — также перерабатывают поступающий сигнал непрерывно, плавно реагируя на каждое его изменение, то вся система управления, включая объект управления, работает непрерывно. Недостатком непрерывных систем является их высокая стоимость по сравнению с дискретными системами, содержащими один или несколько дискретных элементов.

Примерами дискретных элементов являются:

- ЭВМ в качестве регулятора, выполняющая программу по шагам, тактам;
- фотодатчик, выдающий импульс при перемещении контролируемого объекта на шаг датчика;
- шаговый двигатель, поворачивающий ротор на некоторый угол при поступлении на его вход очередного импульса.

При этом анализ показаний датчика обратной связи и выработка управляющего воздействия осуществляются периодически, т.е. такая система существует в дискретном пространстве и времени.

Падение стоимости цифровых элементов обусловило тенденцию к замене аналоговых устройств на дискретные. Следует отметить, что граница между аналоговыми и дискретными элементами условна, так как реальный датчик имеет ограниченную точность, любой исполнительный механизм также имеет вполне определенную точность, и вся система работает в рамках точности ее элементов. Современные дискретные (цифровые) элементы обработки информации способны выдавать управляющие воздействия с частотой нескольких тысяч раз в секунду при погрешности порядка 0,1 %, и работа дискретных систем, построенных на таких элементах, мало отличается от работы аналоговых, непрерывных систем.

3.1.1. Элементы систем автоматического управления

Теоретический анализ и проектирование систем управления являются непростой задачей, для облегчения которой принято системы управления рассматривать как совокупность элементов, имеющих обычно один вход и один выход, соединенных последовательно или параллельно и охваченных обратными связями. Каждый элемент может быть рассмотрен как преобразователь входного сигнала X в выходной сигнал Y. По виду входного и выходного сигналов преобразователи делят на *масштабные*, меняющие уровень сигнала при сохранении его физической природы (рычаг, редуктор, усилитель, трансформатор и т.п.), и *преобразователи вида несущего процесса*, или *преобразователи физической природы сигнала* (электромагнит, электродвигатель, фотоэлемент, электронагреватель и др.).

Различают статические и динамические характеристики преобразователя. Под *статической характеристикой* понимают зависимость установившегося значения выходной величины от входной величины. Статическую характеристику получают в установившемся режиме, после изменения входной величины делается пауза для стабилизации выходной величины, а затем выполняется ее замер. Статическая характеристика описывает поведение устройства при медленно меняющемся входном сигнале.

Важнейшим параметром преобразователя является *статический коэффициент преобразования*, или *передаточный коэффициент*, $k = \dfrac{\Delta Y_{уст}}{\Delta X}$, часто называемый *чувствительностью* S.

Если k не зависит от уровня входного сигнала, то статическая характеристика имеет вид прямой линии, а если k изменяется в

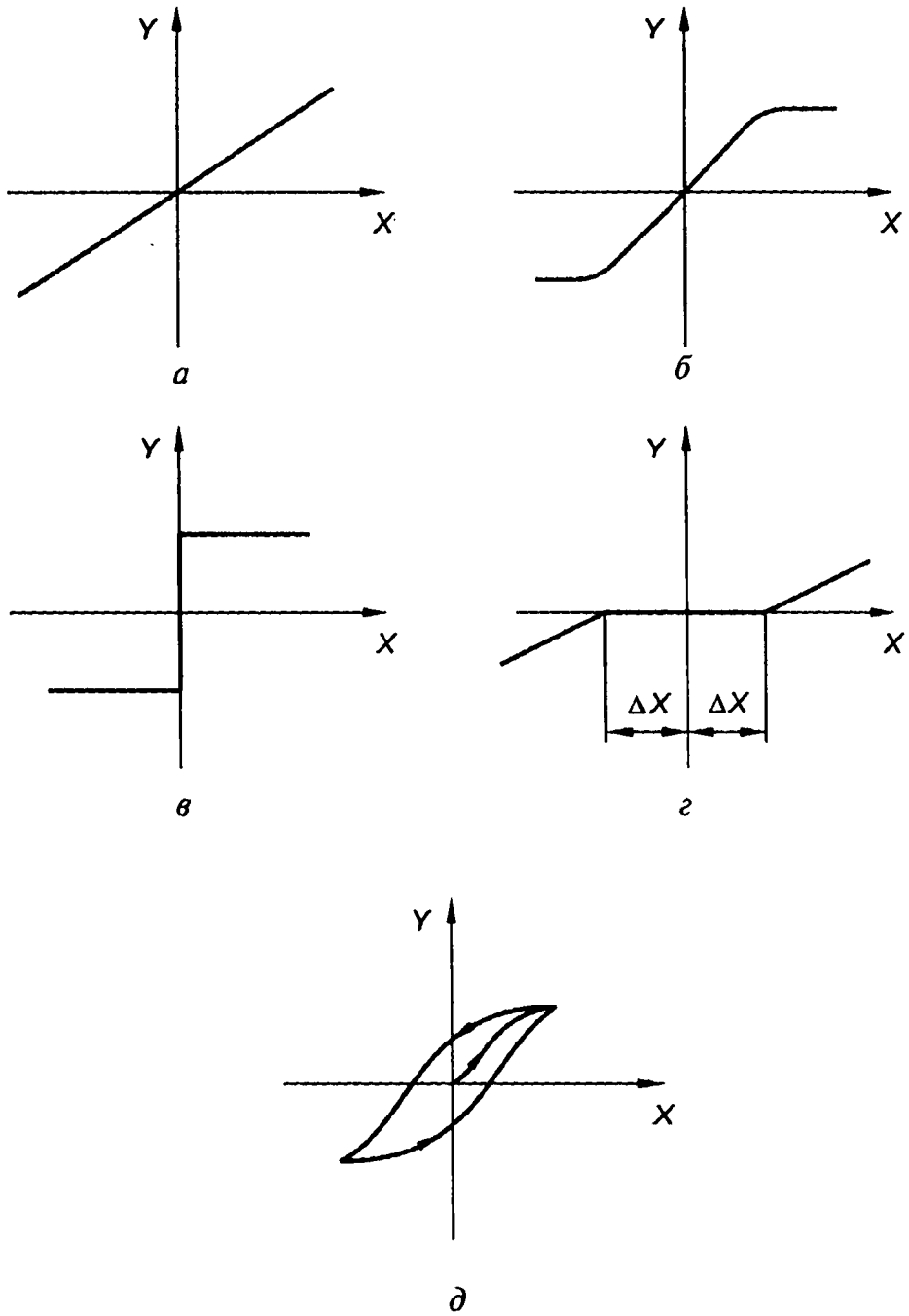


Рис. 3.2. Статические характеристики преобразователей:

а — линейная; *б* — с зоной насыщения, когда при постоянном росте входного сигнала наблюдается уменьшение темпа роста выходного сигнала до нуля (таковы характеристики электронных усилителей); *в* — релейного типа как крайний случай характеристики с зоной насыщения, когда выходная величина может принимать одно из двух значений, переход между которыми осуществляется скачком (изменением сопротивления контактного датчика); *г* — с зоной нечувствительности, когда для начала изменения выходной величины требуется достижение входной величиной некоторого уровня ΔX (например, вследствие зазора между электрическими контактами); *д* — с петлей гистерезиса, когда вследствие остаточных явлений в узлах преобразователя характеристика при изменении X в прямом направлении не совпадает с характеристикой при изменении X в обратном направлении (например, в механическом редукторе при наличии люфтов, в электромагните)

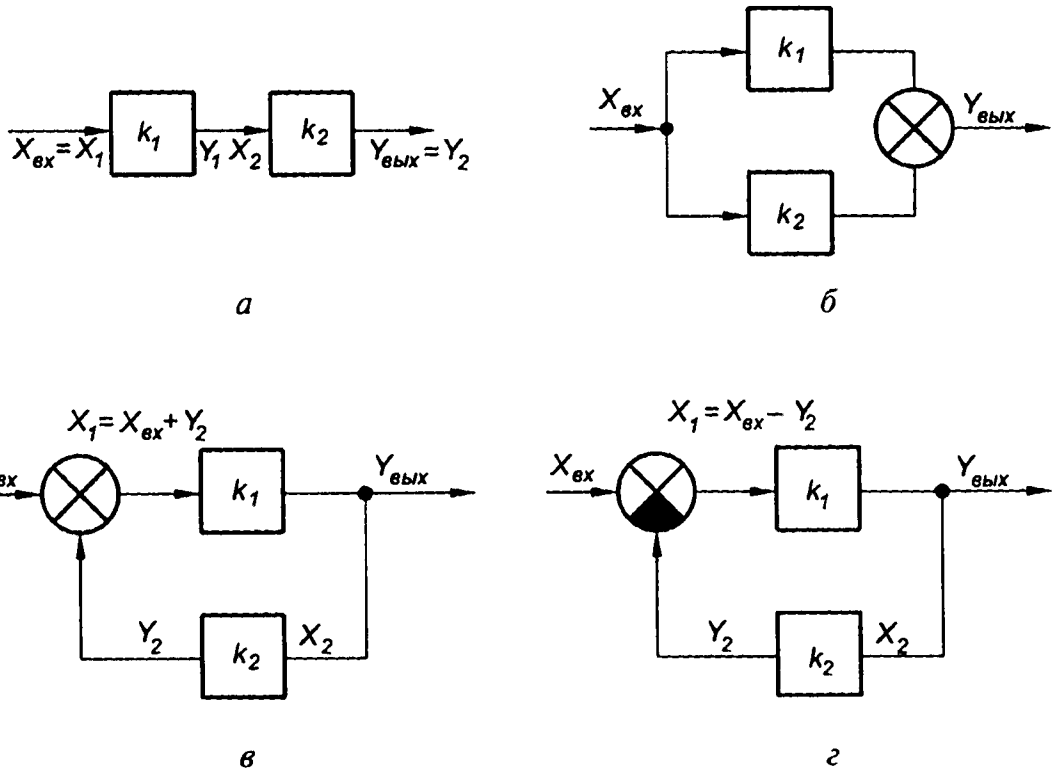


Рис. 3.3. Способы соединения преобразователей

зависимости от величины входного сигнала, то статическая характеристика нелинейна.

На рис. 3.2 приведены основные формы характеристик.

В реальных устройствах возможны комбинации нелинейностей. Например, релейная характеристика с петлей гистерезиса реального поляризованного реле, в котором в зависимости от полярности управляющего напряжения происходит поворот якоря в одном из двух направлений и замыкание одной из групп контактов (релейность), причем вследствие остаточного намагничивания сердечника ток срабатывания превышает ток отпускания (петля гистерезиса).

При последовательном соединении преобразователей (рис. 3.3, *а*) выходной сигнал одного преобразователя является входным сигналом другого преобразователя, а общий коэффициент преобразования равен произведению коэффициентов преобразования элементов, составляющих цепь.

В самом деле, для последовательного соединения двух элементов имеем

$$X_1 = X_{вх},\ \ X_2 = Y_1,\ \ Y_2 = Y_{вых};$$

$$k = \frac{\Delta Y_2}{\Delta X_1} = \frac{\Delta Y_2}{\Delta X_2}\,\frac{\Delta X_2}{\Delta X_1} = \frac{\Delta Y_2}{\Delta X_2}\,\frac{\Delta Y_1}{\Delta X_1} = k_2 k_1.$$

Общий коэффициент преобразования параллельно соединенных элементов (рис. 3.3, *б*) равен сумме коэффициентов преобразования элементов.

Для параллельного соединения двух элементов имеем

$$X_{вх} = X_1 = X_2, \quad Y_1 = k_1 X_1, \quad Y_2 = k_2 X_2;$$

$$Y_{вых} = Y_1 + Y_2 = k_1 X_1 + k_2 X_2 = X_{вх}(k_1 + k_2);$$

$$k = \frac{Y_{вых}}{X_{вх}} = k_1 + k_2.$$

Если один элемент охвачен положительной обратной связью (рис. 3.3, *в*), т. е. сигнал обратной связи суммируется с сигналом на входе прямой цепи, то

$$X_2 = Y_1, \quad X_1 = X_{вх} + Y_2 \text{ или } X_{вх} = X_1 - Y_2, \quad Y_{вых} = Y_1.$$

Это значит, что общий коэффициент преобразования при положительной обратной связи

$$k_{пос} = \frac{Y_{вых}}{X_{вх}} = \frac{Y_1}{X_1 - Y_2} = \frac{k_1 X_1}{X_1 - k_2 X_2} = \frac{k_1 X_1}{X_1 - k_2 Y_1} = \frac{k_1 X_1}{X_1 - k_2 k_1 X_1} = \frac{k_1}{1 - k_1 k_2}.$$

Аналогично выводится формула общего коэффициента преобразования для отрицательной обратной связи (рис. 3.3, *г*), когда сигнал обратной связи вычитается из сигнала на входе прямой цепи (отрицательная обратная связь является важнейшей составной частью систем автоматического регулирования). В этом случае можно записать, что

$$X_1 = X_{вх} - Y_2;$$

$$k_{ООС} = \frac{k_1}{1 + k_1 k_2}.$$

Динамические характеристики описывают поведение элемента при неустановившемся, переходном режиме работы. Если на вход элемента подать короткий импульс достаточной амплитуды, то изменение по времени выходной переменной элемента называется *весовой* или *импульсной переходной функцией* $\Phi(t)$, а ее график — *импульсной переходной характеристикой* (рис. 3.4, *а*). Импульсная характеристика удобна при анализе систем, однако для ее точного определения нужно подать очень короткий импульс большой амплитуды на вход элемента, что практически затруднено в силу инерционности реальных элементов, из которых построена экспериментальная установка.

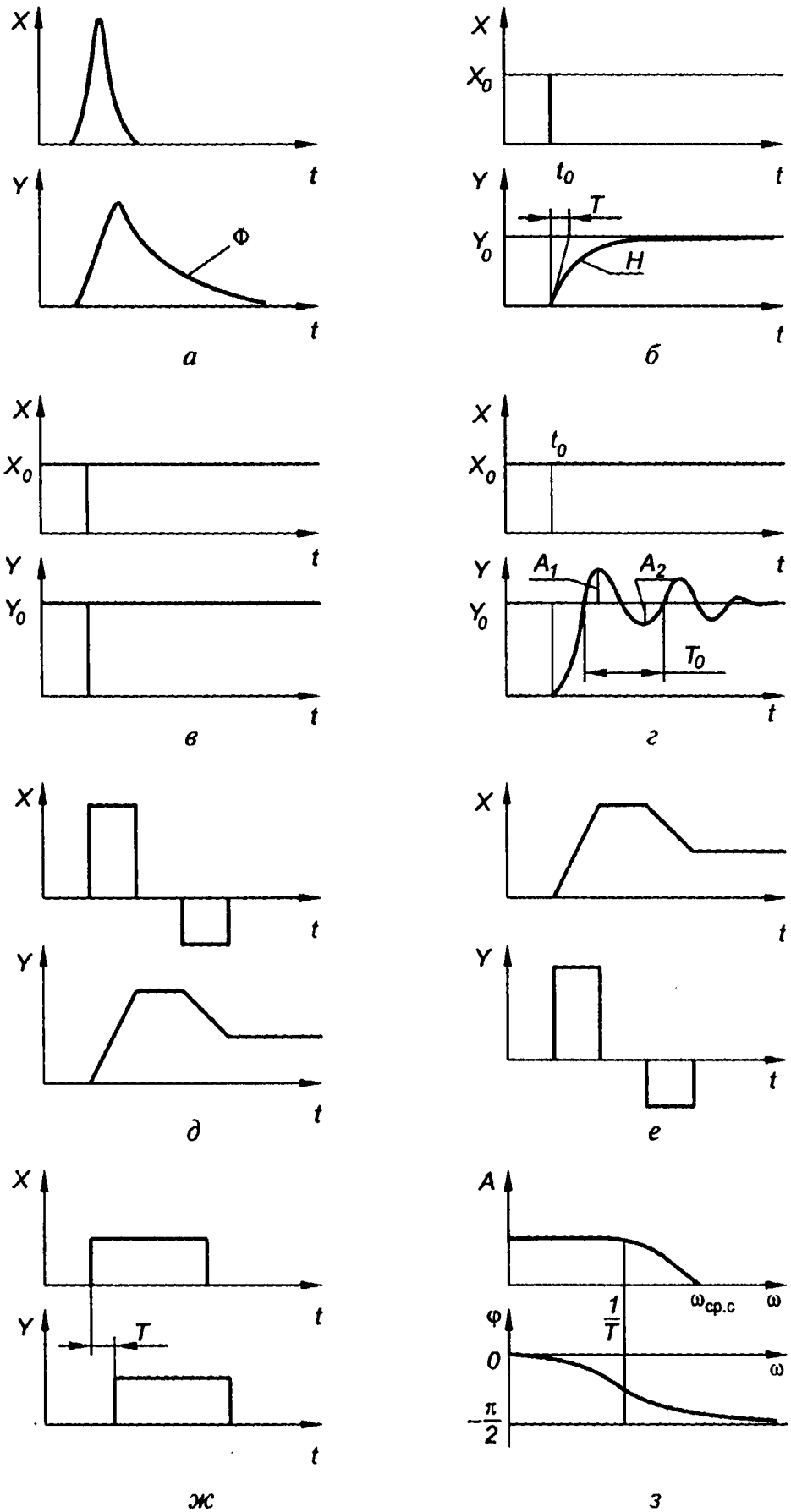


Рис. 3.4. Динамические характеристики преобразователей

Если на вход элемента подать ступенчатое воздействие, то изменение выходной переменной называется переходной функцией $H(t)$, график которой называется переходной характеристикой (рис. 3.4, *б*). Реализацию ступенчатого сигнала возможно осуществить, например, замыканием контактов реле, однако для использования переходной функции $H(t)$ при анализе системы требуется ее пересчет в импульсную переходную функцию $\Phi(t) = \frac{dH}{dt}$.

При анализе систему представляют совокупностью типовых звеньев. Рассмотрим некоторые из них:

- пропорциональное звено (рис. 3.4, *в*) (используется в механическом рычаге, безынерционном электронном усилителе). Звено характеризуется статическим передаточным коэффициентом k;
- инерционное или апериодическое звено 1-го порядка (применяется при теплообмене, при подаче газа в емкость) (см. рис. 3.4, *б*). Звено характеризуется передаточным коэффициентом k и постоянной времени T, определяемой, например, по касательной в точке t_0;
- колебательное звено (амортизатор автомобиля). Характеристики звена (рис. 3.4, *г*): передаточный коэффициент k, коэффициент демпфирования, характеризующий скорость затухания амплитуды колебаний (отношение A_1/A_2), постоянная времени T, определяемая по периоду T_k или частоте колебаний $f = 1/T_k$:

$$\omega = 2\pi f;$$

$$T = \frac{1}{\omega} = \frac{T_k}{2\pi};$$

- интегрирующее звено (рис. 3.4, *д*), в котором входной сигнал задает скорость изменения выходного сигнала (например, таким звеном является электродвигатель, если входной величиной служит напряжение питания, определяющее скорость вращения ротора, а выходной величиной — угол поворота ротора). Конденсатор также может быть этим звеном, если заряд на электрической емкости рассматривать как выходную величину, а ток в цепи заряда как входную. Звено характеризуется передаточным коэффициентом k;
- дифференцирующее звено (рис. 3.4, *е*), выходом которого является скорость изменения входного сигнала. Звено характеризуется передаточным коэффициентом k;
- запаздывающее звено (рис. 3.4, *ж*), в котором входная величина копируется на выход, но с некоторой задержкой по времени $Y(t+T) = X(t)$ (например, ленточный транспортер или эскалатор метро). Звено характеризуется временем задержки T.

В элементах системы управления выходной сигнал из-за инерционности элемента достигает установившегося значения Y_0 через некоторое время после скачка входного сигнала с нуля до X_0, причем в элементе могут возникнуть затухающие (или незатухающие) колебания.

Для работы системы управления, имеет значение быстродействие или время выхода элемента на установившийся режим (см. рис. 3.4, *б*), уменьшение которого может привести к нежелательному перерегулированию A_1 (рис. 3.5, *г*), а также скорости затухания возникших колебаний A_1/A_2 и других параметров. Любой сигнал можно представить суммой гармонических сигналов разной частоты $\omega_j = 2\pi f_j$ с амплитудами A_j и начальными фазами ω_j (разложить в тригонометрический ряд Фурье):

$$X(t) = \sum_{j=0}^{\infty} A_j \cos \omega_j t + \varphi_j,$$

где $\omega_j = \Delta\omega_j$.

В силу своей инерционности реальные элементы по-разному реагируют на входные гармонические сигналы разной частоты. Обычно с ростом частоты входного сигнала постоянной амплитуды амплитуда выходного сигнала падает, и растет отставание по фазе (за исключением звеньев типа дифференцирующего). Зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты $A(\omega) = \dfrac{A_Y}{A_X}$ называется *амплитудной частотной характеристикой* (АЧХ), а зависимость сдвига фазы $\varphi(\omega) = \varphi_Y - \varphi_X$ — *фазовой частотной характеристикой* (ФЧХ). На рис. 3.4, *з* приведены частотные характеристики апериодического звена 1-го порядка.

Частота, выше которой амплитуды выходных гармоник равны нулю, называется частотой среза сигнала $\omega_{ср.с}$. Максимальная частота гармоник, пропускаемых преобразователем, называется частотой среза преобразователя $\omega_{ср.п}$. Естественным требованием является способность элемента преобразовывать входной сигнал во всем его частотном диапазоне: $\omega_{ср.п} > \omega_{ср.с}$.

Динамические характеристики отражают быстродействие (инерционность) устройства и важны для быстро протекающих процессов.

В зависимости от вида используемой энергии преобразователи классифицируют на электрические, гидравлические и пневматические.

Электрический сигнал является наиболее универсальным и удобным для систем автоматики по сравнению с другими (пневматическими и гидравлическими) сигналами из-за простоты:

передачи на большие расстояния, что удобно для дистанционного управления;

усиления, преобразования и обработки в электронных устройствах;

преобразования электроэнергии в другие виды энергии (механическую, тепловую);

малой инерционности электрических элементов.

Однако электроэлементы автоматики обладают и рядом недостатков, например невысокой мощностью исполнительных устройств, иногда недостаточным быстродействием. Во избежание потребления энергии разных видов обычно стремятся использовать в цепи управления преобразователи, использующие один внешний источник энергии — электросеть, гидросистему или заводскую сеть сжатого воздуха. Если исполнительное устройство должно развивать большую мощность, используют гидро- или пневмопривод; в этом случае будет разумным применить корректирующие и усилительные устройства этого типа. Однако реализация сложных алгоритмов управления возможна только на базе электрических преобразователей, поэтому типичным является использование электрических датчиков, преобразующих данные об объекте в форму электрического сигнала, электрических регуляторов, усилителей, переключателей, электромеханических преобразователей для преобразования электрического сигнала в механическое перемещение регулирующего органа гидро- или пневмопривода, дающего требуемую для управления рабочим органом мощность.

По функции, выполняемой в системе управления, элементы можно условно разделить на следующие группы:

датчики или первичные преобразователи, выполняющие замеры контролируемых параметров объекта управления (перемещения, температуры, давления и т.д.);

усилители, усиливающие слабый сигнал датчика до уровня, требуемого системой управления, или усиливающие управляющее воздействие с регулятора до мощности, достаточной для перемещения рабочего органа;

корректирующие устройства, изменяющие сигнал в целях повышения качества регулирования, например фильтр, освобождающий сигнал датчика от электромагнитных помех;

переключающие устройства, управляющие цепями передачи сигналов и потоков энергии и обеспечивающие логику управления, например электромагнитное реле или золотниковый гидрораспределитель;

аналогово-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, обеспечивающие связь управляющей микроЭВМ с элементами аналогового, непрерывного действия типа усилителя;

задающие устройства, хранящие и воспроизводящие по времени заданные законы изменения параметров объекта управления;

исполнительные устройства, преобразующие усиленный до нужной мощности управляющий сигнал в форму, требуемую для

управления рабочим органом, обычно в механическое перемещение, например электродвигатель или рабочий гидроцилиндр.

3.2. Первичные преобразователи (датчики)

Важнейшими элементами систем управления являются датчики, предназначенные для получения количественной информации о подлежащих измерению механических, тепловых, оптических и других величинах.

Так как системы управления строятся в основном на основе электронных регуляторов, то при измерении любых величин чаще других применяются электрические средства измерений, обладающие следующими преимуществами:

простотой изменения чувствительности в широком диапазоне значений измеряемой величины за счет использования усилителей электрических сигналов;

малой инерционностью электрической аппаратуры, позволяющей использовать одни и те же средства измерений для процессов, протекающих во времени в широком диапазоне скоростей;

практически мгновенной (со скоростью света) передачей сигнала на значительные расстояния, упрощающей замеры в недоступных местах и позволяющей одновременный замер большого количества величин разной физической природы на больших расстояниях.

Датчики обычно классифицируются и получают названия по измеряемой ими величине и параметру, в который преобразуются сигналы чувствительного элемента, например индуктивный датчик перемещения преобразует измеряемое перемещение объекта в изменение индуктивности и реактивного сопротивления дросселя. Измерение есть операция сравнения измеряемой физической величины с другой величиной того же рода, принятой за единицу.

Измерительное преобразование представляет собой преобразование значения одной физической величины в значение другой физической величины, функционально с ней связанной. Например, в термометре температура преображается в длину столбика ртути или спирта, при этом функциональной связью между этими величинами является закон теплового расширения жидкостей.

Многие неэлектрические величины удобно предварительно преобразовать в механическое перемещение, после чего с помощью датчика перемещения получить электрический сигнал. Например, давление газа или жидкости можно определить замером перемещения упругой мембраны. Поэтому в автоматике широкое распространение получили датчики перемещения.

Измерительный прибор (рис. 3.5, *а*), как правило, состоит из первичного преобразователя (датчика *Д*), указателя или регистратора (*УК*), представляющего измеряемую величину в удобной

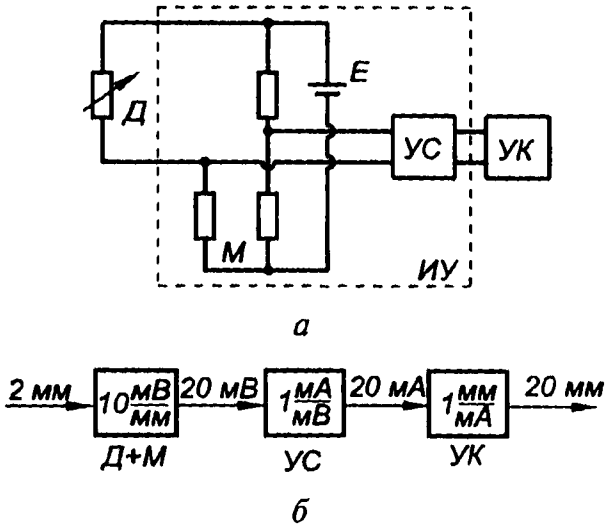


Рис. 3.5. Структура измерительного прибора

для использования форме, и измерительного устройства (*ИУ*), осуществляющего преобразование выходного сигнала датчика во входной сигнал указателя. Например, при измерении температуры можно в качестве датчика использовать терморезистор (резистор, меняющий свое сопротивление при изменении температуры), в качестве указателя можно взять амперметр с соответствующей градуировкой; измерительным устройством здесь будет электрическая схема контроля изменения сопротивления терморезистора, включающая измерительный мост *М* и усилитель *УС*. Таким образом, измеряемая величина подвергается в измерительном приборе серии преобразований.

Условия на реальном объекте измерения обычно значительно более жесткие, чем в месте регистрации (повышенная температура, вибрации, влажность, пыль, недостаток места). Поэтому в точке, в которой необходимо провести измерение, размещается минимум преобразователей, достаточный для фиксации значения измеряемой величины и преобразования его в форму, пригодную для передачи из зоны объекта в более благоприятную зону (хотя бы на расстояние нескольких метров), где размещается измерительное устройство.

Датчиком измерительного прибора называется совокупность преобразователей, размещаемых непосредственно на объекте измерения и удовлетворяющих, как правило, более жестким эксплуатационным требованиям. Указатель, регистратор, устройство отображения информации должны быть размещены там, где используются результаты измерения, например на пульте оператора. При создании указателей основным требованием является удобство использования результатов замеров.

Раздельное конструктивное исполнение датчиков, измерительных устройств и указателей в совокупности со следованием стандартам соответствующих входных и выходных величин этих элементов обеспечивает гибкость в применении, простой ремонт, универсальность и взаимозаменяемость. Обычно датчик состоит из двух преобразователей: предварительного, воспринимающего измеряемую величину (щуп, рычаг) без перевода ее в другую форму, и основного, предназначенного для преобразования измеряемой величины в электрический сигнал.

3.2.1. Свойства и разновидности измерительных преобразователей

Объект измерения — это сложное явление (или процесс), характеризующееся множеством отдельных параметров, действующих на датчик одновременно. Измеряемой величиной является один интересующий нас параметр.

Результат измерения — выходной параметр измерительного преобразователя. Его вид не зависит от объекта измерения и полностью определяется требованиями потребителя информации. *Естественной входной величиной* преобразователя называется параметр, который воспринимается лучше других мешающих факторов. Например, сопротивление реостата зависит и от температуры, и от влажности каркаса, и от других факторов. Однако главным фактором, естественной входной величиной реостата является положение ползунка. Аналогично вводится *естественная выходная величина* преобразователя как параметр, точнее других отражающий результат измерения. Например, при перемещении ползунка реостата помимо изменения его сопротивления меняется (как следствие) ток в цепи и падает напряжение (на естественных выходных величинах), что влечет за собой изменения других параметров: температуры проводников, напряженности электромагнитного поля и т.д.

По виду естественной выходной величины преобразователи делят на две группы: генераторные, когда естественной выходной величиной является ЭДС или ток (например, фотодатчик, термопара), и параметрические, когда естественной выходной величиной является изменение сопротивления, индуктивности или емкости чувствительного элемента, которые потом преобразуются в изменение напряжения или тока в измерительном устройстве.

Снимаемые с датчиков сигналы могут быть двух типов:

- аналоговые, или непрерывно меняющиеся в некотором амплитудном диапазоне (например, напряжение на термопаре);
- дискретные, принимающие одно из заранее известных состояний (например, двоичный или бинарный сигнал ДА/НЕТ от конечного выключателя).

Датчики, применяемые при автоматизации производства, должны иметь унифицированные (стандартные) выходные сигналы. Например, датчики, выходным сигналом которых является напряжение, должны отвечать ряду: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 В. Датчики, выходным сигналом которых является ток, должны отвечать ряду: 1; 2; 5; 10; 20 мА.

Функция преобразования измерительного преобразователя — это статическая характеристика первичного преобразователя или функциональная зависимость выходной величины от входной, представленная аналитически (формулой) или графиком. В случае аналогового датчика всегда стремятся иметь линейную характеристи-

ку преобразования, упрощающую анализ измерения и сам прибор. Реальные измерительные преобразователи в силу своих конструктивных особенностей имеют характеристику, близкую к линейной лишь в небольшом диапазоне изменения входной величины, за границами которого располагаются зоны насыщения. Поэтому, если возможно, рабочий диапазон преобразователя ограничивают этим линейным участком характеристики.

Если требуется использование преобразователя в диапазоне шире рабочего, приходится в цепь преобразователей вводить дополнительное нелинейное звено, корректирующее возникшую нелинейность (в простейшем случае это применение нелинейной шкалы указателя). Для описания линейной характеристики преобразования $Y = f(X)$ достаточно двух параметров: начального значения выходной величины Y_0, соответствующего нулевому (или любому другому) уровню входной величины X, и чувствительности преобразователя (коэффициента пропорциональности) $S = dY/dX$.

Чувствительность S имеет размерность отношения выходной величины к входной, например для реостатного преобразователя это Ом/мм, электродвигателя — об/(с · В). Чувствительность измерительного прибора, состоящего из последовательного ряда преобразователей, определяется произведением чувствительностей всех преобразователей ряда

$$S_{и.п} = S_1 S_2 S_3 \ \ldots \ S_n.$$

Пусть прибор состоит из трех преобразователей (рис. 3.5, *б*):

датчика перемещения *Д* с измерительным мостом *М*, создающих выходное напряжение 10 мВ при перемещении щупа на 1 мм, т.е. $S_д$ = 10 мВ/мм;

усилителя мощности *УС* с чувствительностью $S_{ус}$ = 1 мА/мВ;

указателя *УК* с чувствительностью $S_{ук}$ = 1 мм/мА (при изменении тока на входе указателя на 1 мА стрелка переместится на 1 мм).

При перемещении щупа датчика на 2 мм на его выходе возникнет напряжение $Y_д = S_д X_д = 10$ мВ / мм · 2 мм = 20 мВ.

Ток на выходе усилителя

$$Y_{ус} = S_{ус} X_{ус} = S_{ус} Y_д = 1 \text{ мА/мВ} \cdot 20 \text{ мВ} = 20 \text{ мА}$$

и перемещение стрелки указателя

$$Y_{ук} = S_{ук} X_{ук} = S_{ук} Y_{ук} = 1 \text{ мм/мА} \cdot 20 \text{ мА} = 2 \text{ мм}.$$

Тогда чувствительность измерительного прибора

$$S_{и.п} = \Delta Y_{ук} / \Delta X_д = 20 \text{ мм}/2 \text{ мм} = 10.$$

Зная чувствительности элементов, составляющих измерительную цепь, легко напрямую рассчитать чувствительность прибора

$$S_{ип} = S_д S_{ус} S_{ук} = 10 \text{ мВ/мм} \cdot 1 \text{ мА/мВ} \cdot 1 \text{ мм/мА} = 10.$$

Качество измерительного прибора принято характеризовать *погрешностью*. Погрешности делят на *инструментальные*, обусловленные недостаточным качеством узлов прибора и порождаемые трением, влиянием температуры или влажности на узлы прибора, и *методические*, обусловленные самим методом измерения и сохраняющиеся даже в идеальном случае. Примером методической погрешности является влияние температурного расширения жидкости, масса которой контролируется датчиком уровня.

По влиянию на результат измерения погрешности делят на следующие виды.

Грубые ошибки (промахи, выбросы) возникают при кратковременном нарушении условий измерения, например в результате скачка напряжения электросети или механического толчка; они выглядят как аномалии и должны быть исключены экспериментатором. Это вносит субъективный элемент в результаты измерения, следует стремиться к предотвращению выбросов.

Систематические погрешности вызываются факторами, действующими одинаковым образом в процессе измерения, например неверная настройка прибора. Эти погрешности неизменны по времени и могут быть устранены введением поправки в показания прибора. Однако систематические погрешности трудно обнаружить в силу их неизменности. Поэтому измерительные приборы периодически проверяют сравнением их показаний с показаниями эталонного прибора.

Случайные ошибки — это суммарный эффект действия большого количества малозначимых факторов. Они меняются от замера к замеру, т.е. непредсказуемы, а потому неустранимы.

Абсолютной погрешностью измерения называют отклонение результата измерения от истинного значения измеряемого параметра. *Относительная погрешность* определяется как отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемого параметра, позволяющее судить о степени влияния абсолютной погрешности на результат измерения.

Например, абсолютная погрешность 0,1 мм мала при измерении размера 100 мм (относительная погрешность составит 0,1 %), но велика при измерении размера 1 мм (относительная погрешность в этом случае равна 10 %).

Особенно удобна относительная погрешность в случае пропорциональности абсолютной погрешности значению измеряемого параметра, например для погрешности чувствительности преобразователя S. В этом случае относительная погрешность остается неизменной.

Под *порогом чувствительности* прибора понимают наименьшее изменение значения измеряемой величины, вызывающее заметное на фоне помех и шумов изменение результата измерения, например наименьшее значение параметра, которое может быть

измерено на фоне погрешности (для нулевого значения измеряемой величины она называется погрешностью нуля).

Полным диапазоном измерительного преобразователя называют интервал значений измеряемой величины от значения погрешности нуля, когда относительная погрешность равна 100 %, до предела измерений, когда указатель прибора упирается в ограничитель, а погрешность измерения может быть сколь угодно большой.

Рабочим диапазоном называют часть полного диапазона, в которой относительная погрешность не превосходит некоторой величины.

Разрешающая способность прибора — это число градаций измеряемой величины, различаемое на выходе прибора, или число неперекрывающихся интервалов диапазона измерения, для которых возможно однозначное определение того, попало или нет в данный интервал значение измеряемой величины. Разрешающая способность прибора тем выше, чем меньше погрешность измерения и шире рабочий диапазон, поэтому она является обобщенной характеристикой точности прибора.

В системах автоматики широко применяют цифровые дискретные датчики, представляющие измеряемую величину последовательностью или совокупностью двоичных сигналов (импульсов). Различают *абсолютные первичные преобразователи* (или *датчики абсолютных значений*), имеющие однозначную зависимость между входной величиной и выходным кодом, и *инкрементные первичные преобразователи* (*датчики накапливающего типа*, или *датчики приращений*), в которых монотонное изменение входной величины вызывает последовательность импульсов на выходе. Для получения значения измеряемого параметра нужно суммарное число импульсов от датчика умножить на шаг, соответствующий одному импульсу.

Цифровые датчики используют преимущественно в цифровых, дискретных системах управления, где анализ кода или операция подсчета числа импульсов не вызывают трудностей.

3.2.2. Измерительные цепи

Измерительные цепи с генераторными первичными преобразователями предназначены главным образом для усиления сигнала от датчика до уровня, достаточного для надежной передачи на требуемое расстояние и для регистрации. Основной задачей при проектировании является взаимное согласование смежных преобразователей по сопротивлениям их входных и выходных цепей.

Измерительные цепи с параметрическими преобразователями предназначены для преобразования изменения активного (резистор) или реактивного (индуктивность или емкость) сопротивле-

ния в изменение напряжения или тока. Естественно, при замере реактивных сопротивлений обязательно использование источника питания переменного тока. При замере активного сопротивления возможно применение питания как переменным, так и постоянным током. Окончательное решение принимается из сторонних соображений: конструкции измерительного устройства и регистратора, наличия источника питания переменного или постоянного тока и т.д. Ниже рассмотрены несколько вариантов измерительных цепей прямого преобразования для определения изменения сопротивления первичного преобразователя (тензорезистора, терморезистора, индуктивного датчика).

Простейшая измерительная цепь последовательного включения чувствительного элемента показана на рис. 3.6, *а*. Датчик под действием измеряемой величины меняет свое сопротивление R_0, в результате чего меняется ток в цепи и отклонение стрелки указателя *УК*. Основным недостатком такой схемы является нелинейная (гиперболическая) зависимость тока в цепи от сопротивления

$$I = I_0 + \Delta I = \frac{E}{R_н + R_0 + \Delta R}.$$

Нелинейность может быть учтена за счет нелинейной градуировки шкалы указателя (что неудобно для применения в системах управления) или работы на малом участке гиперболической характеристики, когда кривизной можно пренебречь, а характеристику считать линейной. Это приводит к сужению рабочего диапазона и снижению чувствительности и точности прибора. Схема измерительной цепи в виде делителя напряжения представлена на рис. 3.6, *б*. Если параметрическим преобразователем является R_2, то можно показать, что максимальная чувствительность преобразователя $S = \Delta_н/\Delta R$ достигается при $R_1 = R_2 = R_0$, а $\Delta U_н/E = 0{,}25\Delta R/R_0$ (при изменении R_2 на 4 % $U_н$ изменится на 1 %).

В дифференциальном преобразователе (рис. 3.6, *в*) оба плеча R_1 и R_2 делителя активны, при изменении входной величины они оба меняются, но в противоположных направлениях (при увеличении сопротивления первого плеча R_1 на ΔR сопротивление второго плеча R_2 падает на ΔR). В этом случае характеристика преобразователя полностью линейна; если быть точным, эта характеристика линейна при сопротивлении нагрузки (входном сопротивлении вольтметра) $R_н = \infty$.

Максимальная чувствительность преобразователя достигается при $R_1 = R_2$, когда $\Delta U_н /E = 0{,}5\Delta R/R_2$.

На рис. 3.6, *г* приведен дифференциальный преобразователь, построенный на реостате путем его потенциометрического включения. Главной задачей при расчете такой измерительной цепи является правильный выбор $R_1 = R_2$ в зависимости от входного сопротивления указателя $R_н$.

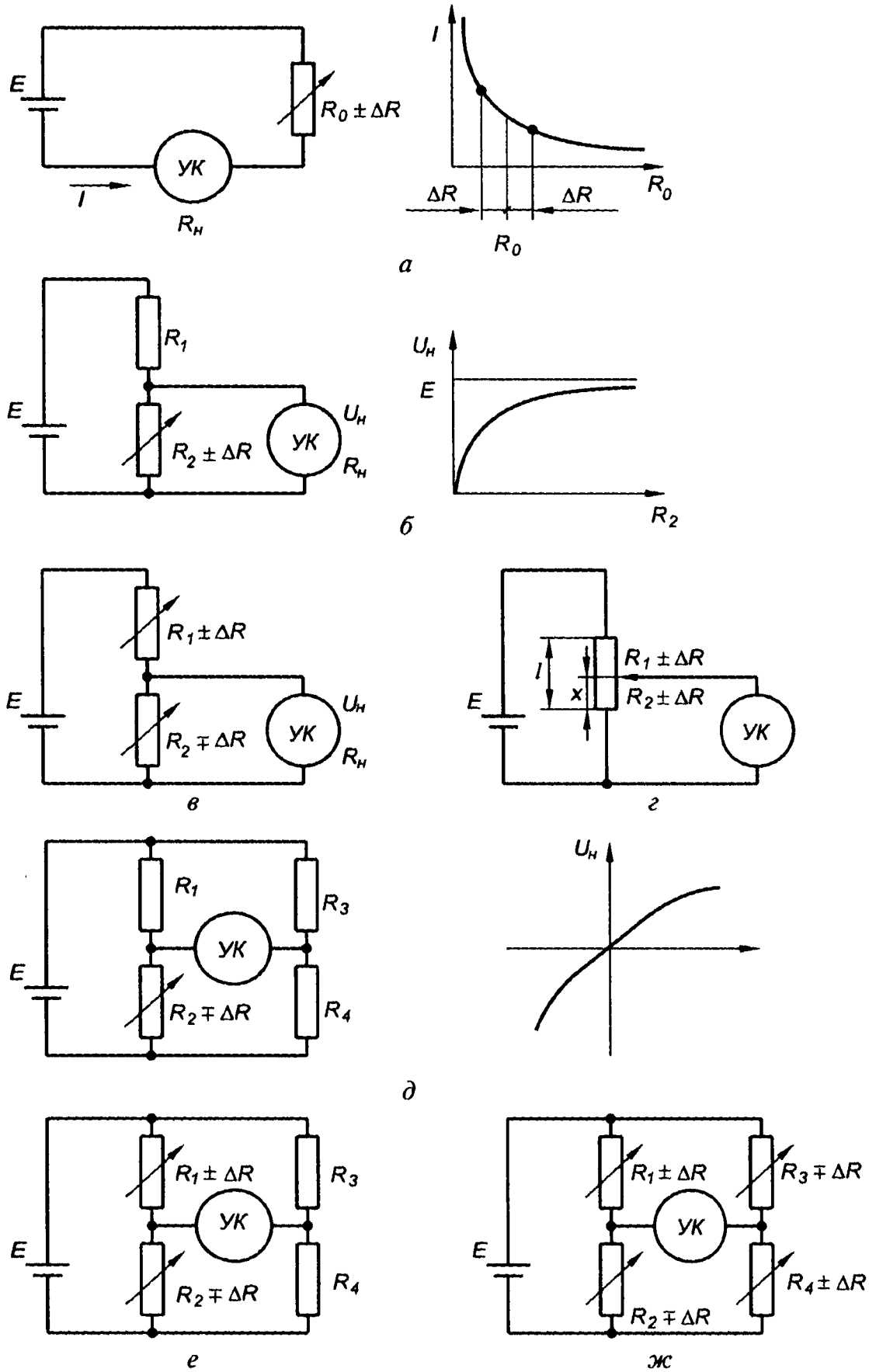


Рис. 3.6. Измерительные цепи

Главным недостатком рассмотренных измерительных цепей является ненулевое значение выходного параметра (тока или напряжения) при базовом значении входной величины и соответственно базовых значениях R_1, R_2.

В неравновесных мостах для устранения этого недостатка проводят исходную компенсацию начального значения выходного сигнала Y, так что при нулевом входном сигнале выходной сигнал также равен нулю. Для этого к делителю R_1, R_2 (рис. 3.6, *д*), содержащему параметрический преобразователь R_2, добавляются еще делители R_3, R_4 с тем, чтобы при $X = 0$ и начальном значении $R_2 = R_0$ ток в выходной цепи $I_н$ и напряжение на указателе $U_н$ отсутствовали.

Состояние равновесия моста ($U_н = 0$) устанавливается перед началом измерения при $X = 0$ регулировкой сопротивления одного из плеч моста при постоянных сопротивлениях остальных плеч (условие равновесия моста $R_2 / R_1 = R_3 / R_4$). Характеристика рассмотренного моста может считаться линейной лишь в узком диапазоне, где при $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ и $R_н = \infty$ выполняется примерное равенство $\Delta U_н / E = 0{,}25\,\Delta R / R_0$.

Неравновесный мост с дифференциальным преобразователем и двумя активными плечами моста R_1 и R_2 (рис. 3.6, *е*) имеет линейную характеристику при повышенной чувствительности.

При $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ и $R_н = \infty$ справедливо равенство $\Delta U_н / E = 0{,}5\,\Delta R / R_0$.

Значение коэффициента 0,5 объясняется влиянием на выходное напряжение $U_н$ изменения как R_2, так и R_1. Следует подчеркнуть, что сопротивления плеч R_1 и R_2 должны меняться в противоположных направлениях. Если оба сопротивления возрастут или уменьшатся на одну и ту же величину ΔR, то мост останется в равновесии и $U_н$ не изменится. В частности, одновременное изменение сопротивлений плеч моста в результате изменения температуры не проявится на результатах измерений, что также является существенным преимуществом мостовых измерительных схем.

Неравновесный мост с двумя дифференциальными преобразователями (рис. 3.6, *ж*) имеет четыре активных плеча моста R_1, R_2, R_3, R_4, включенных так, чтобы при увеличении сопротивлений R_1 и R_4 на ΔR происходило уменьшение сопротивлений R_2 и R_3 на ΔR. Такой мост имеет линейную характеристику и еще большую чувствительность. При $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ и $R_н = \infty$ справедливо равенство $\Delta U_н / E = \Delta R / R_0$.

Возможны другие способы построения неравновесных мостов (например, активными плечами могут быть R_1 и R_4 и даже R_1 и R_3), однако для всех них справедливо следующее.

Наибольшее влияние на точность измерения оказывает относительная чувствительность параметрического преобразователя

$\Delta R/R$. Вторым по значимости фактором является допустимая потребляемая мощность преобразователя. Из формул следует, что добиться роста выходного напряжения можно повышением напряжения питания E, что приведет к повышению токов в цепи и нагреву преобразователя.

Обычно преобразователи имеют жесткое ограничение на рабочую температуру, что отражается в ограничении на максимально допустимый ток через него и напряжение питания моста. Так, для тензодатчиков рекомендуемый номинальный ток $I_{ном}$ составляет 30 мА, что при его сопротивлении $R_2 = 100$ Ом дает напряжение питания $E = I_{ном}(R_1 + R_2)$ порядка 5 В. Измерительные мосты переменного тока несколько сложнее мостов постоянного тока, однако многие параметрические преобразователи не могут применяться в цепях постоянного тока. Индуктивные и емкостные датчики меняют реактивное сопротивление плеча моста, замерить которое можно только пропуская через него переменный ток. Кроме того, усиление и передача переменного тока значительно проще, чем постоянного. Поэтому измерительные цепи переменного тока часто используют даже в тех случаях, когда можно было бы работать и на постоянном токе (например, при использовании в качестве параметрических преобразователей тензо- и терморезисторов).

При использовании в активных плечах моста реактивных преобразователей возникают некоторые трудности с уравновешиванием плеч моста (требуется уравновесить как активную, так и реактивную составляющие их сопротивлений). Это делается подстроечными емкостями и резисторами, что несколько усложняет измерительную цепь. В целом же результаты и рекомендации, полученные для цепей постоянного тока, справедливы и для цепей переменного тока.

Приборы, построенные на принципе прямого преобразования, отличаются высоким быстродействием, простотой и надежностью, низкой стоимостью и малыми габаритами, что обусловило их широкое распространение. Однако в случае длинной цепи преобразователей результирующая погрешность, формирующаяся из погрешностей всех преобразователей цепи, может стать недопустимо большой.

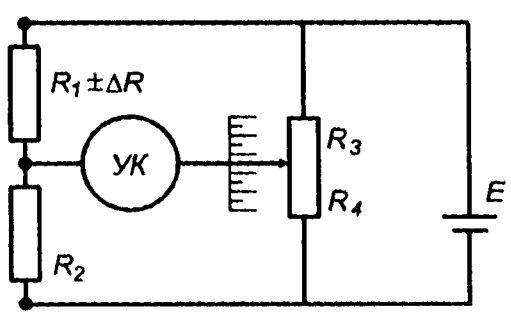


Рис. 3.7. Схема равновесного измерительного моста

Метод уравновешивания, или компенсации, предусматривает компенсацию сигнала от датчика напряжением, управляемым автоматически или вручную так, чтобы ток в измерительной цепи стал равным нулю. На рис. 3.7 приведена простейшая схема измерительной

ной цепи для контроля сопротивления R_1 датчика, включенного в равновесный мост. Положение движка реостата выбирается так, чтобы ток через указатель и показание указателя были равны нулю. По положению движка можно судить о значении сопротивления датчика. Контроль положения движка осуществляется по шкале, проградуированной в соответствии с назначением прибора.

Приборы, построенные на принципе компенсации, обладают высокой точностью и быстродействием, но отличаются высокой сложностью и стоимостью.

3.2.3. Контактные резистивные преобразователи

Контактными называются измерительные преобразователи, в которых измеряемое механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. При этом естественной входной величиной является пространственное перемещение, выходной величиной — ток в цепи, а характеристика имеет релейный характер.

Так как сопротивление контактного датчика меняется скачком и может принимать одно из двух значений, этот датчик является дискретным. Так как под действием входной величины меняется сопротивление датчика, он является параметрическим.

Простейший однопредельный контактный преобразователь (рис. 3.8, *а*) имеет одну пару контактов *1* и *2*, замыкание которых произойдет при перемещении вверх штока *5*. При этом активное сопротивление между контактами упадет от бесконечности до очень малого значения контактного сопротивления. Конструктивно шток устанавливается в направляющие *4* и прижимается пружиной *6* к контролируемому объекту *3*. Погрешность срабатывания контактных преобразователей находится в пределах 1...2 мкм. Попытки еще уменьшить погрешность успеха не имели.

Во избежание образования дуги или искры, разрушающих контакты, мощность тока в цепи не должна превышать 100 мВт. Это значит, что если звено цепи — приемник сигнала от датчика — потребляет мощность 50... 100 мВт, то можно снимать сигнал непосредственно с датчика. В противном случае следует использовать усилитель на реле, транзисторах или тиристорах. Датчики этого типа широко применяются как конечные выключатели, датчики контроля попадания размера в поле допуска и т.д.

3.2.4. Реостатные и потенциометрические преобразователи

Реостатным преобразователем называют реостат, движок которого перемещается щупом вслед за перемещением контролируемой точки объекта, т.е. преобразователи этого типа являются регу-

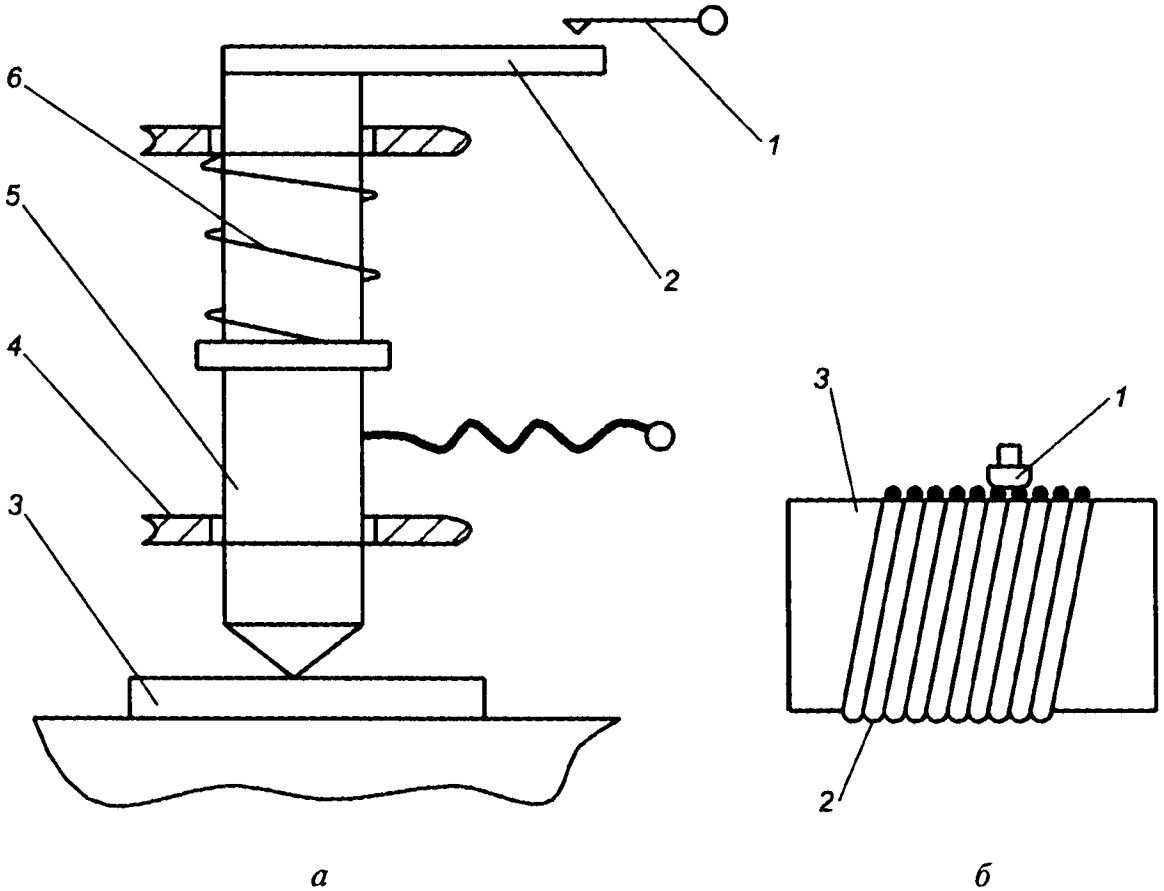


Рис. 3.8. Контактный (*а*) и реостатный (*б*) датчики

лируемыми омическими сопротивлениями. Естественной входной величиной датчиков этого типа является перемещение движка.

При последовательной схеме включения (см. рис. 3.6, *а*) датчик называется *реостатным*, перемещение движка реостата преобразуется в изменение активного выходного сопротивления реостата или тока, являющихся естественными выходными величинами. При схеме делителя напряжения (схеме потенциометра) (см. рис. 3.6, *г*) датчик называется *потенциометрическим первичным преобразователем*, его естественной выходной величиной является выходное напряжение.

Так как выходной величиной реостата служит сопротивление, датчик является параметрическим; сопротивление меняется плавно при изменении входной величины (положения движка), датчик является аналоговым. Сопротивление реостата может зависеть от перемещения движка как линейно (чаще всего), так и по более сложному закону.

Основным требованием, предъявляемым к этим датчикам, является обеспечение определенной однозначной зависимости между величиной сопротивления и перемещением движка.

Основными элементами реостатного датчика (рис. 3.8, *б*) являются: каркас *3* из диэлектрика (дерево, текстолит, пластмасса)

с нанесенным на него сопротивлением в виде обмотки *2* из проволоки, слоя полупроводника или пленки металла; подвижная токосъемная щетка *1*, скользящая непосредственно по поверхности сопротивления или по ряду соединенных с ним контактов.

На рис. 3.9 приведена конструкция потенциометрического датчика для измерения угловых перемещений, состоящего из каркаса *3* с обмоткой *1*, по которой ходит движок *2* с подвижным контактом *4*.

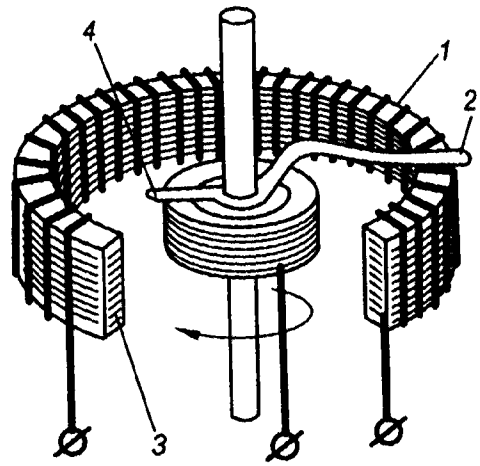


Рис. 3.9. Потенциометрический датчик угловых перемещений: *1* — обмотка; *2* — движок; *3* — каркас; *4* — подвижный контакт

Материалы проволоки, используемые для намотки реостатных датчиков, указаны в табл. 3.1.

На практике чаще других используются константан, нихром и манганин, обладающие низкой стоимостью, высоким удельным сопротивлением, обеспечивающим высокую точность измерения, и широким температурным диапазоном. Кроме того, эти материалы стойки к износу и коррозии, что обеспечивает хороший контакт с движком.

Таблица 3.1

Материал	Удельное сопротивление, Ом · мм²/м	Максимальная рабочая температура, °С
Константан	0,48	500
Нихром	1,1 ... 1,2	1050
Манганин	0,42	300
Платина	0,09 ... 0,105	500
Золото	0,022	500

Щетки выполняют в виде проволок, лент или роликов из бронзы, серебра, платиноиридиевого сплава и других упругих материалов. Провод реостата должен быть покрыт эмалью или слоем окислов, изолирующих витки друг от друга. Вдоль траектории движка изоляция счищается, а сам провод полируется. Активное сопротивление реостата составляет десятки и сотни ом при погрешности порядка 1 %. Индуктивное и емкостное сопротивления реостата малы, и ими можно пренебречь при частотах до 10 кГц. Сопротивление реостата меняется скачкообразно при переходе движка с одного витка на другой, соседний. Чтобы уменьшить погрешность квантования, увеличить разрешающую способность и сделать датчик практически аналого-

вым, число витков выбирают обычно не меньше 100. Для реостатных первичных преобразователей пригодны все ранее рассмотренные виды измерительных цепей, из которых типичной является цепь потенциометрического включения (см. рис. 3.6, *г*), когда $U_н = Ex/l$.

Достоинствами реостатных датчиков являются:

простота конструкции;

высокий уровень выходного сигнала (напряжение — до нескольких десятков вольт, ток — до нескольких десятков миллиампер);

возможность работы как на постоянном, так и на переменном токе.

Недостатками этих преобразователей являются:

невысокая надежность и ограниченная долговечность вследствие износа скользящего контакта и истирания обмотки;

сравнительно большое усилие, необходимое для перемещения ползунка;

опасность искрообразования на контакте обмотки с ползунком;

относительно большие габаритные размеры.

Реостатные датчики применяются для измерения больших перемещений (десятки миллиметров) с точностью до 0,1 мм. В автоматических системах движок реостата может быть механически связан с суппортом, клапаном или другим подвижным элементом, положение которого требуется измерять и передавать в виде электрического сигнала. При перемещении элемента перемещается и движок, вызывая изменение тока и напряжения в цепи. Чем сильнее движок прижимается к обмотке, тем надежнее контакт, но больше усилие, требуемое для перемещения движка. Это вызывает определенные трудности при конструировании измерительного прибора, так как усилие, развиваемое чувствительными элементами (мембранами, поплавками и т. п.) часто невелико.

3.2.5. Электромагнитные первичные преобразователи

Электромагнитные первичные преобразователи предназначены для преобразования перемещения в электрический сигнал за счет изменения параметров электромагнитной цепи. Возможно изменение магнитного сопротивления магнитной цепи датчика за счет перемещения сердечника или изменения воздушного зазора в магнитной цепи. В том и другом случае меняются индуктивность и реактивное сопротивление индуктивного датчика или взаимоиндуктивность и напряжение в выходной обмотке трансформаторного датчика.

Индуктивный преобразователь имеет одну катушку переменной индуктивности L. При приложении к преобразователю пере-

менного напряжения с амплитудой U и частотой ω в нем возникнет ток с амплитудой

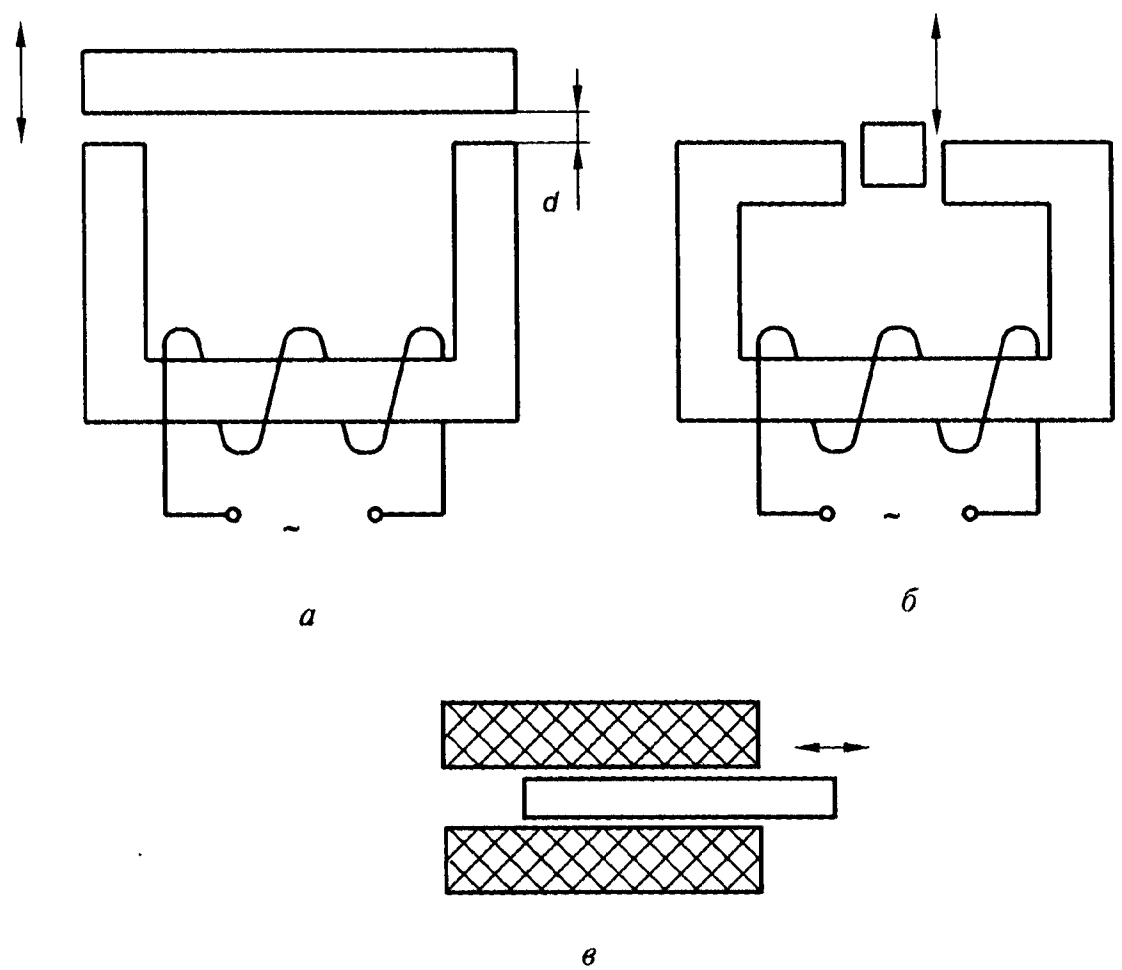
$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{Z},$$

где $Z = \omega L$ — реактивное сопротивление катушки.

Изменение индуктивности катушки L в результате перемещения или поворота элементов магнитопровода при перемещении щупа датчика при постоянном напряжении питания приводит к изменению тока в измерительной цепи, которое и контролируется. Так как выходной величиной индуктивных датчиков является непрерывно меняющаяся величина реактивного сопротивления, эти датчики обычно относятся к параметрическим аналоговым.

На рис. 3.10, *а* изображен преобразователь с переменным воздушным зазором *d*. Рабочее перемещение подвижного сердечника составляет 0,01 ... 10 мм. На рис. 3.10, *б* показан преобразователь с переменной площадью воздушного зазора. Рабочее перемещение в этом случае составляет 5 ... 20 мм.

На рис. 3.10, *в* изображен преобразователь с разомкнутой магнитной цепью — катушка с перемещающимся сердечником.



а *б* *в*

Рис. 3.10. Схемы индуктивных датчиков перемещений

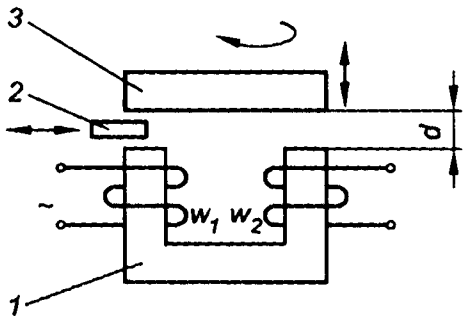


Рис. 3.11. Трансформаторный датчик перемещений:
1 — неподвижный сердечник; *2* — ферромагнитная вставка; *3* — подвижный сердечник

Рабочее перемещение таких датчиков составляет 10... 100 мм. Известны и другие схемы индуктивных преобразователей.

Трансформаторные (взаимоиндуктивные) первичные преобразователи действуют по принципу трансформатора. На рис. 3.11 изображена схема трансформаторного преобразователя, в который входят две катушки w_1 и w_2 и магнитопровод, состоящий из П-образного неподвижного сердечника *1*, подвижного сердечника *3* и воздушного зазора шириной d между ними. К первичной обмотке w_1 приложено переменное напряжение e_1, возбуждающее в ней переменный ток I_1, который в свою очередь вызывает в ней переменный магнитный поток

$$\Phi_1 = L_{12} I_1 w_1,$$

где w_1 — число витков во входной обмотке; L_{12} — взаимоиндуктивность, определяемая геометрией катушек, числом витков катушек w_1 и w_2, геометрией и материалом магнитопровода.

Магнитное поле концентрируется в замкнутом магнитопроводе так, что магнитный поток одинаков во всех поперечных сечениях магнитопровода, в том числе и в выходной обмотке $w_2 \Phi_2 \approx \Phi_1$.

Переменный магнитный поток Φ_2 через обмотку w_2 вызывает в ней ЭДС

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = e_1 \frac{w_2}{w_1}$$

и ток $I_2 \approx I_1 \frac{w_1}{w_2}$.

В отличие от трансформатора в преобразователе сердечник имеет меньшую взаимоиндуктивность L_{12} за счет воздушного зазора. При перемещении подвижного сердечника *3* по вертикали, его повороте или перемещении ферромагнитной вставки *2* меняются: геометрия сердечника, магнитное сопротивление и магнитный поток в магнитной цепи и, как следствие, взаимоиндуктивность L_{12}, что ведет к изменению тока и напряжения на выходной обмотке w_2. Таким образом, в трансформаторных преобразователях естественной входной величиной является перемещение или поворот элементов сердечника, естественной выходной величиной — изменение взаимоиндуктивности и, как следствие, изменения тока и напряжения на выходной обмотке. Так как выходной величиной этих датчиков является непрерывно меняющаяся величина вы-

ходного напряжения и тока, они обычно относятся к генераторным аналоговым датчикам.

Возможно построение индуктивного или трансформаторного датчика силы на основе эффекта изменения магнитной проницаемости материала сердечника в результате упругих деформаций растяжения, сжатия, кручения под действием приложенных сил (так называемого магнитоупругого преобразователя). В этом случае естественными входной и выходной величинами чувствительного элемента являются упругая деформация сердечника и взаимоиндуктивность. Датчики этого типа являются дискретными, инкрементными, параметрическими.

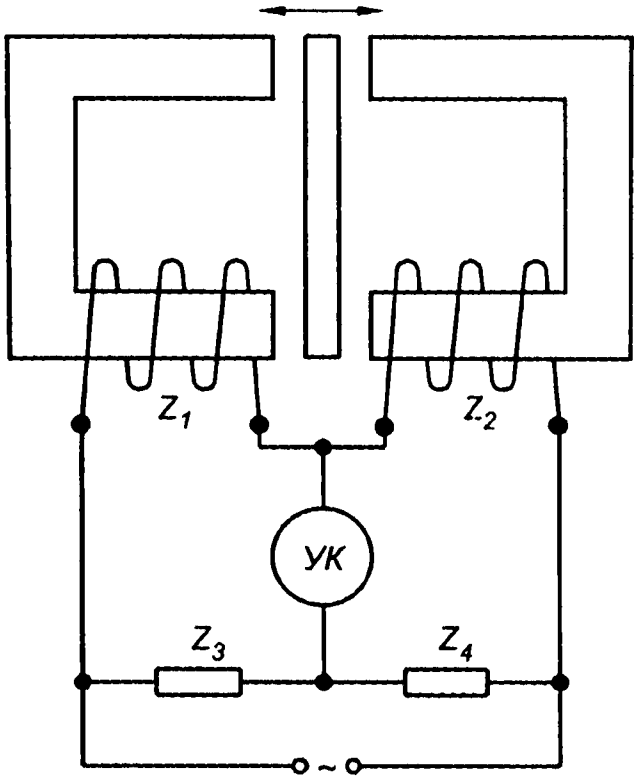
Электромагнитные датчики имеют линейную характеристику с зонами насыщения. Погрешность преобразователей с переменным воздушным зазором составляет 1...1,5 %, погрешность магнитоупругих преобразователей достигает 4 %. Как правило, питание измерительной цепи индуктивных и трансформаторных преобразователей осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжение питания не превышает 300 В, диаметр провода обмоток составляет не менее 0,07 мм.

Одним из основных достоинств электромагнитных преобразователей является возможность получения мощного выходного сигнала (1...5 Вт), что снижает чувствительность измерительного прибора к электромагнитным помехам и позволяет использовать на выходе измерительной цепи малочувствительный указатель, например самописец. Лишь для малогабаритных преобразователей необходимо включать усилитель между измерительной цепью и указателем.

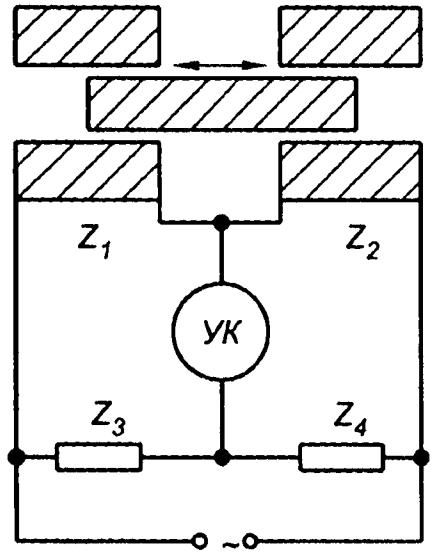
Существенным преимуществом индуктивных и трансформаторных датчиков является высокая надежность и практически неограниченный срок службы благодаря отсутствию механического контакта подвижных частей чувствительного элемента. Для уменьшения погрешности датчика и обеспечения линейности его характеристики часто используют дифференциальный преобразователь, состоящий из двух катушек и перемещающегося магнитного сердечника (рис. 3.12, *а*, *б*). Изменение индуктивностей катушек (активных плеч неравновесного моста) при перемещении щупа происходит в противоположных направлениях.

Для точного измерения больших перемещений (например, перемещения суппорта токарного станка) применяют линейные и круговые индуктивные преобразователи с зубчатыми сердечниками (рис. 3.12, *в*). При совмещении выступов подвижного и неподвижного сердечников индуктивность максимальна, при совмещении выступов впадинами — минимальна.

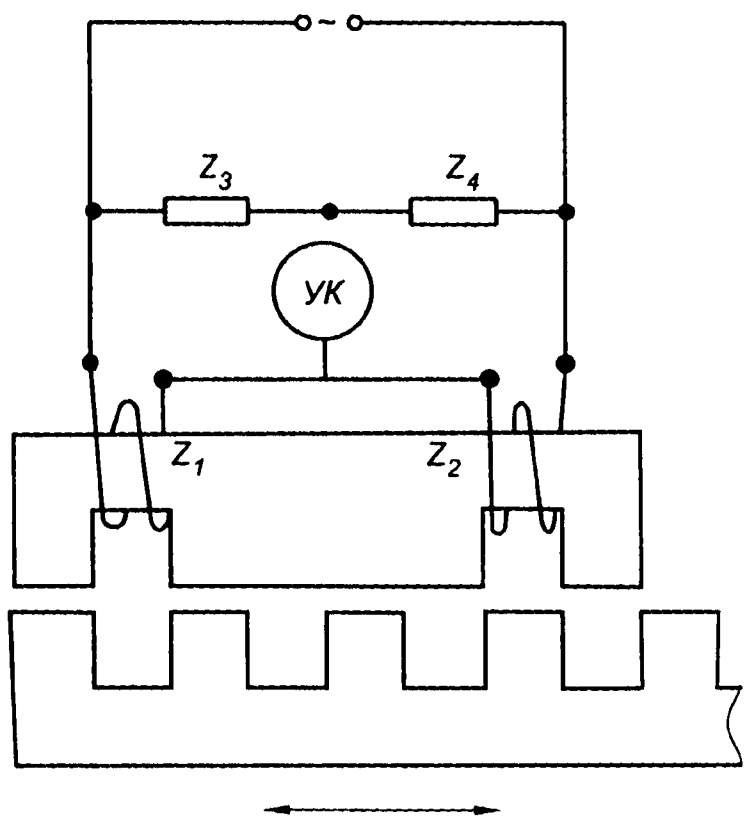
При перемещении подвижного сердечника реактивное сопротивление чувствительного элемента и ток в цепи меняются периодически так, что импульс в цепи соответствует перемещению щупа и сердечника на шаг зубьев.



а



б



в

Рис. 3.12. Измерительные схемы индуктивных датчиков

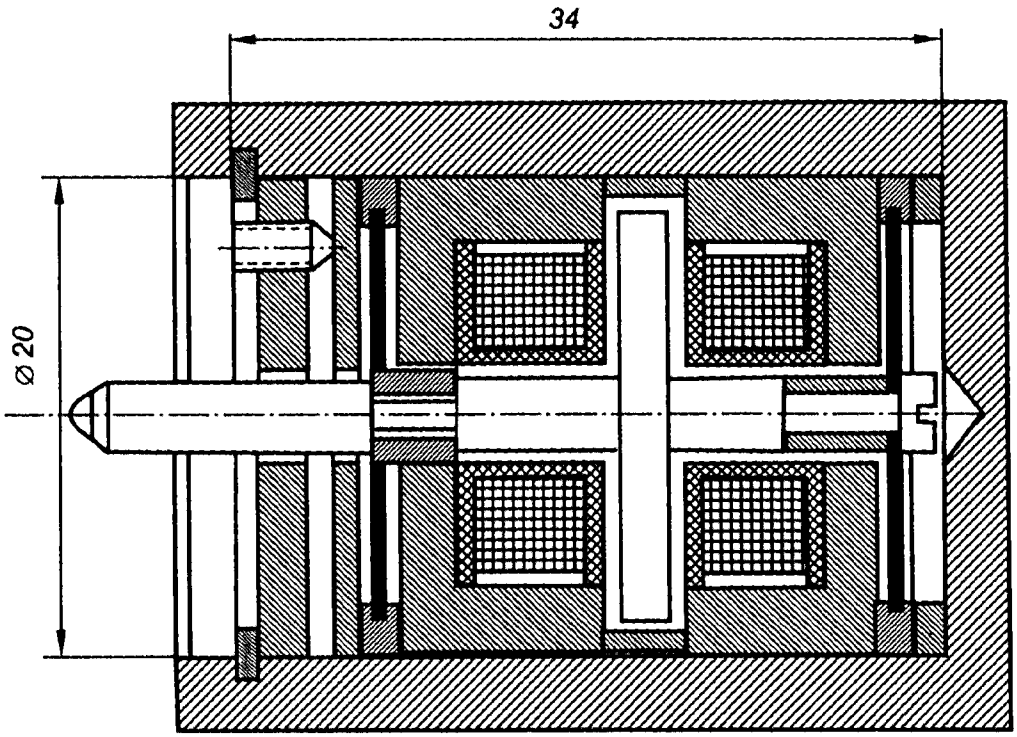


Рис. 3.13. Индуктивный датчик перемещения

Дифференциальный преобразователь строится из двух пар зубчатых сердечников так, что при совпадении выступов первой пары во второй паре выступ совпадает с впадиной, и пары сердечников работают в противофазе.

На рис. 3.13 приведена конструкция дифференциального индуктивного датчика перемещений, применяемого в динамометрах для определения усилия резания. Якорь датчика с диском укреплен на двух упругих мембранах между катушками и цилиндрическими элементами магнитопровода. При перемещении якоря в осевом направлении зазор между диском и одной из катушек растет (индуктивность этого датчика падает), зазор между диском и другой катушкой падает (индуктивность растет). Катушки включены в мостовую схему.

Одинарные индуктивные датчики применяют в качестве бесконтактных датчиков положения и концевых выключателей. Дифференциальные датчики позволяют замерять перемещения в диапазоне от сотых долей миллиметра до десятков сантиметров и широко применяются в системах управления разного назначения.

3.2.6. Емкостные первичные преобразователи

Емкостной преобразователь представляет собой конденсатор, имеющий два электрода площадью S, разделенных слоем диэлектрика толщиной d с абсолютной диэлектрической проницаемостью ε_a.

Заряд конденсатора определяется по формуле

$$q = CU,$$

где q — заряд на каждой из пластин конденсатора, $[q]$ = Кл; $C = \varepsilon_a \frac{S}{d}$ — емкость конденсатора, $[C]$ = Ф; $\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость, $[\varepsilon_a]$ = Ф/м; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, $\varepsilon \geq 1$; U — разность потенциалов, или напряжение на конденсаторе, $[U]$ = В.

При изменении емкости C за счет изменения расстояния между электродами d, их площади S или средней диэлектрической проницаемости пространства между ними ε_a в цепи конденсатора возникает электрический ток $I = \Delta q/\Delta t$. На этом основано действие емкостных измерительных преобразователей. Емкость C и реактивное сопротивление $Z_C = \frac{1}{\omega C}$ конденсатора в цепи переменного тока с круговой частотой $\omega = 2\pi f$ могут изменяться при перемещении щупа и изменении зазора между обкладками (рис. 3.14, *а*). Это датчики для измерения перемещений 0,001 ... 1 мм. Рис. 3.14, *б* иллюстрирует работу дифференциального преобразователя, в котором подвижная обкладка *2* перемещается щупом между неподвижными обкладками *1* и *3*. Диэлектриком является воздух. При перемещении обкладки *2* влево емкость между обкладками *1* и *2* растет, между *2* и *3* — убывает. Емкостные преобразователи с переменным зазором отличаются высокой чувствительностью (до 500 В/мм), линейной зависимостью сопротивления от зазора, малыми погрешностями и простотой конструкции. Они применяются для измерения малых перемещений. Емкость C и реактивное сопротивление Z_C могут изменяться при перемещении щупа и изменении площади пластин конденсатора вследствие сдвига обкладок относительно друг друга (рис. 3.14, *в*). Это датчики для измерения перемещений более 1 мм. Достоинством таких преобразователей является возможность соответствующим выбором формы подвижной и неподвижной пластин получить заданную функциональную зависимость между изменением емкости и входным перемещением. Еще один вариант конструкции емкостного датчика: емкость C и реактивное сопротивление конденсатора Z_C реагируют на перемещение щупа и изменение средней диэлектрической проницаемости за счет перемещения диэлектрика между обкладками (рис. 3.14, *г*). Датчики такой конструкции удобны, когда оказывается нежелательным электрическое соединение щупа с подвижной пластиной преобразователя. Рис. 3.14, *д* иллюстрирует работу дифференциального преобразователя, в котором

подвижный элемент *3* из диэлектрика (например, кварца) перемещается щупом между неподвижными обкладками *1*, *2* и *4*. При перемещении щупа влево подвижный элемент заполняет пространство между обкладками *1* и *4*. Так как ε диэлектрика больше ε воздуха, то средняя ε_a и емкость между обкладками *1* и *4* растут, в то время как емкость между обкладками *2* и *4* падает.

Естественной входной величиной емкостного преобразователя является перемещение, естественной выходной величиной — его непрерывно меняющаяся емкость и реактивное сопротивление, поэтому эти датчики относятся к аналоговым параметрическим. В качестве измерительных цепей используются неравновесные мосты переменного тока в сочетании с дифференциальным преобразователем, емкости которого являются активными плечами моста.

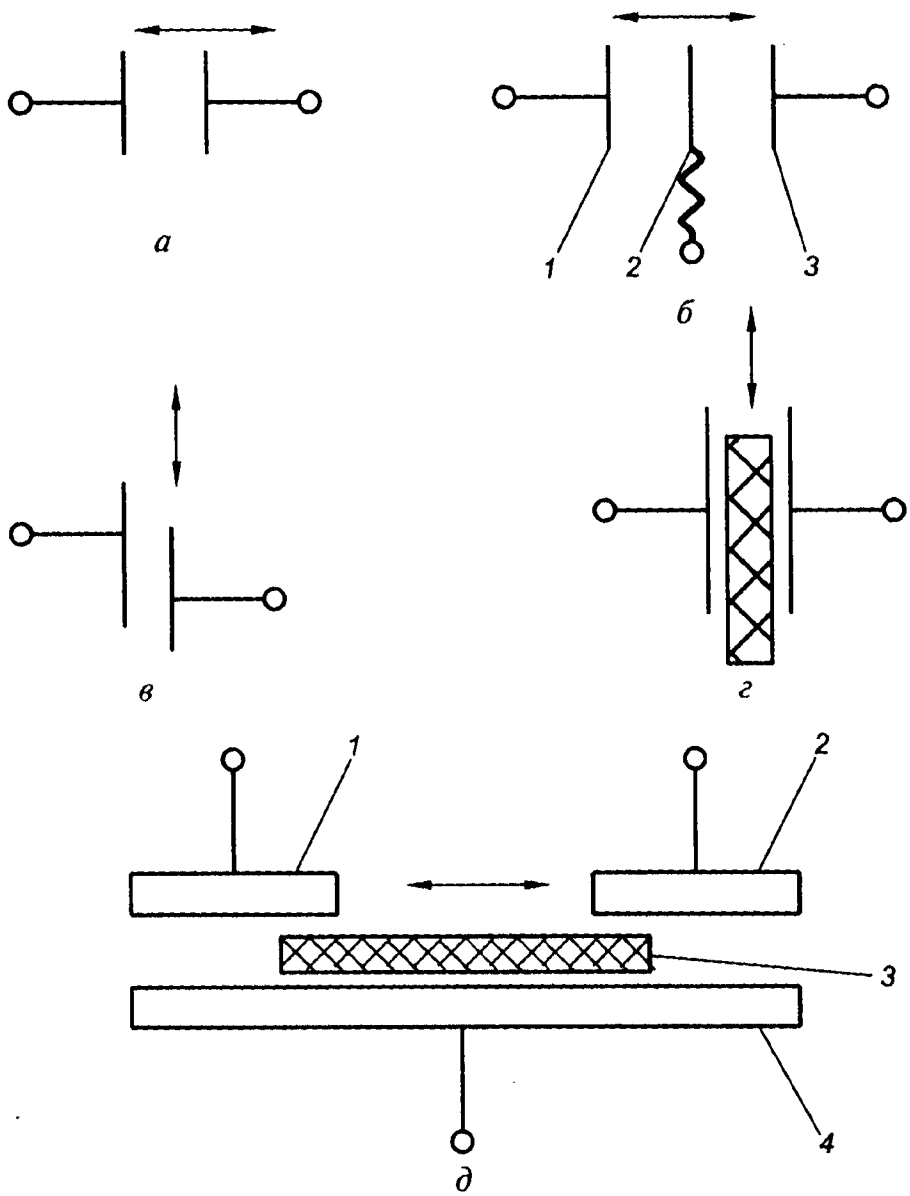


Рис. 3.14. Схемы емкостных датчиков:
1 — 4 — обкладки

В качестве пассивных плеч используются низкоомные резисторы, полуобмотки трансформатора или индуктивности.

Емкость большинства емкостных преобразоваетелей очень мала и составляет 10... 100 пФ, поэтому даже на высоких частотах их реактивное сопротивление велико (10^3... 10^7 Ом), ток в измерительной цепи и мощность выходного сигнала малы, что требует использования усилителя, соединенного с преобразователем с помощью экранированного или коаксиального провода. И экранированный, и коаксиальный провод снижают электромагнитные наводки, однако сами они обладают значительной емкостью между жилой и заземленным экраном. Все это усложняет измерительную цепь и снижает чувствительность и быстродействие измерительного прибора.

Таким образом, основной проблемой при создании емкостных измерительных приборов является устранение погрешности за счет емкости соединительного провода в сочетании с эффективной защитой слабого полезного сигнала от электромагнитных помех на соединительном проводе. Для уменьшения сопротивления преобразователя частота питающего напряжения составляет обычно 10^5... 10^7 Гц (не меньше 500 Гц).

Такие датчики являются дискретными, инкрементными, параметрическими.

На рис. 3.15, *а* приведен емкостной инкрементный датчик с переменной площадью пластин, используемый для измерения больших угловых перемещений, например угла поворота вала привода подач станка. Ротор *2*, жестко скрепленный с валом *3*, перемещается относительно статора *1* так, что длина зазора между ними остается постоянной, а ширина меняется периодически, вызывая периодическое изменение емкости преобразователя. На рис. 3.15, *б* приведена схема абсолютного датчика для измерения небольших угловых перемещений. Емкостные датчики применя-

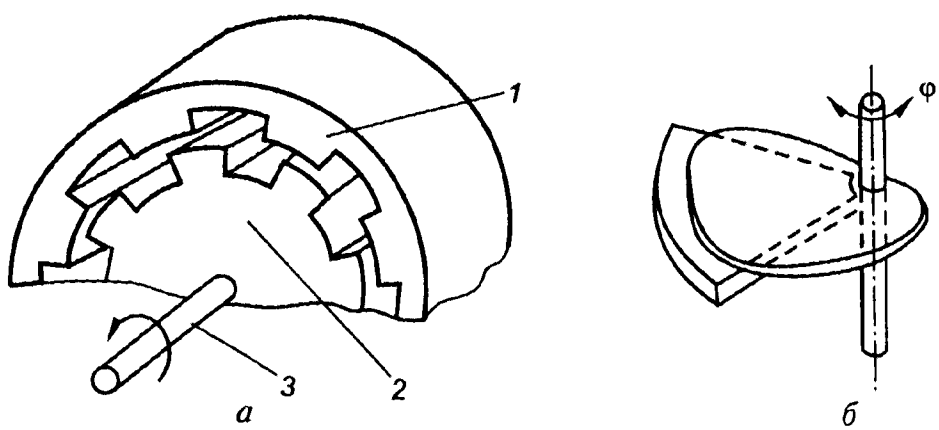


Рис. 3.15. Емкостные датчики угловых перемещений с переменной емкостью пластин:
1 — статор; *2* — ротор; *3* — вал

ются для измерения уровня токонепроводящих жидкостей и сыпучих тел, толщины различных тел и покрытий в процессе их изготовления, а также линейных и угловых перемещений в широком диапазоне.

3.2.7. Пьезоэлектрические преобразователи

Работа этих преобразователей основана на *пьезоэлектрическом эффекте*. Пьезоэлектрическими называются кристаллы или текстуры, электризующиеся под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и деформирующиеся в электрическом поле (обратный пьезоэффект).

В зависимости от величины силы сжатия или растяжения меняется количество зарядов на гранях кристалла, перепендикулярных одной из осей симметрии кристаллической решетки (электрической оси). Одновременно меняется и разность потенциалов между этими гранями.

Заряд на гранях кристалла при деформации не зависит от геометрии кристалла, но определяется приложенной силой F и положением граней относительно электрической оси симметрии кристаллической решетки:

$$q = K_0 F,$$

где K_0 — пьезоэлектрический модуль материала, $[K_0] = \text{Кл} / \text{Н}$.

Пьезоэлектрические свойства различных материалов показаны в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Кристалл	Пьезоэлектрический модуль K_0, Кл /Н	Диэлектрическая проницаемость ε
Кварц	0,0021	4,5
Сегнетова соль	2,1	9000
Титанат бария	0,225	10 000

Кварц дешев, механически прочен, является хорошим электроизолятором. Однако его пьезоэлектрический модуль сравнительно невысок. Пьезоэлектрический модуль сегнетовой соли в 1000 раз больше, однако ее свойства сильно зависят от температуры и влажности. Титанат бария имеет большое значение K_0, он механически прочен и нечувствителен к температуре и влажности, однако стареет: его K_0 падает примерно на 10 % за год.

Если приложенная сила не меняется, то заряды на гранях кристалла стекают в воздух или через изоляцию и разность потенциалов исчезает. Поэтому пьезоэлементы пригодны только для измерения динамических процессов.

Эти датчики относятся к генераторным и широко применяются в бытовой технике (например, в звукоснимателе проигрывателя).

Пьезоэлектрические датчики нашли широкое применение в машиностроении. Прямой пьезоэффект используется при измерении быстро протекающих процессов, например вибраций, когда быстро меняющееся напряжение на гранях пьезоэлемента усиливается и фиксируется. Обратный пьезоэффект используется для генерации высокочастотных звуковых колебаний, когда высокочастотное переменное электрическое напряжение подается на пьезоэлемент, который сжимается и разжимается с той же частотой, порождая в воздухе акустические волны.

Пьезоэлектрические преобразователи конструктивно просты, малогабаритны, надежны и широко применяются для измерения давления, силы, ускорения. На рис. 3.16, *а* показано устройство пьезоэлектрического датчика давления с двумя кварцевыми пластинами. Измеряемое давление действует на мембрану *1*, являющуюся дном корпуса датчика. Кварцевые пластины *7* зажаты между металлическими прокладками *6*. Средняя прокладка соединена с выводом *3*, проходящим через экранированную втулку *2* из изоляционного материала. Крышка *5* соединяется с корпусом и через шарик *4* передает давление металлической прокладке и кварцевым пластинам. Использование двух (и более) пластин повышает выходную ЭДС, складывающуюся из ЭДС, возникающих на отдельных пластинах.

На рис. 3.16, *б* показан пьезоэлектрический датчик ускорения, используемый для измерения вибраций. Пьезоэлемент *5* из титаната бария расположен на корпусе прибора *4* между инерционной массой *3* и подпятником *2*. Инерционная масса *3* и пьезоэлемент *5* прижаты к подпятнику *2* гайкой *1* через пяту *6* с изоляционной прокладкой и контактной пластиной. Датчик позволяет измерять ускорения от 0,2 до 1 *g* при частоте до 5 Гц.

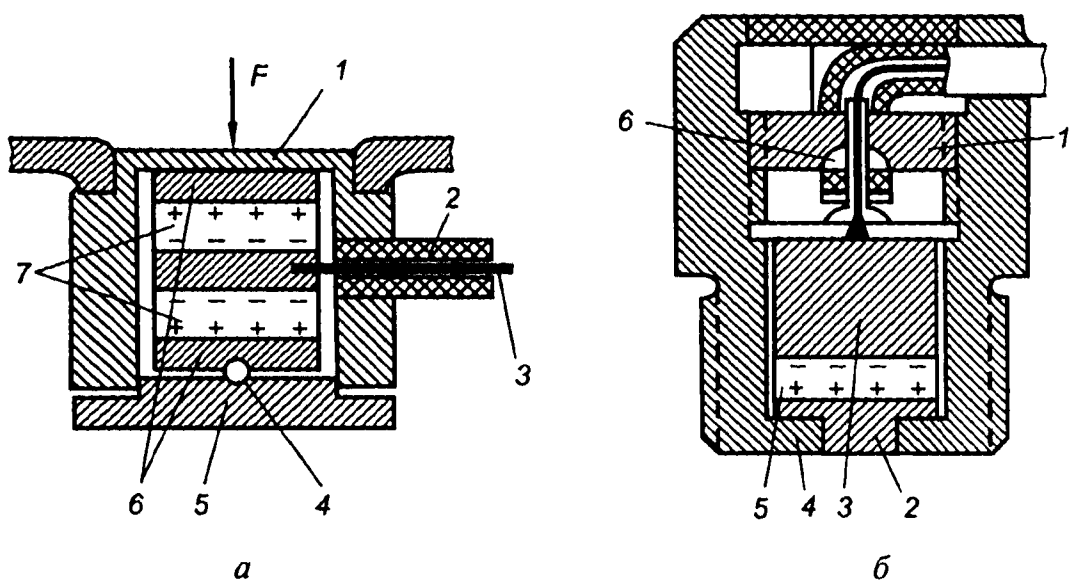


Рис. 3.16. Пьезоэлектрические датчики давления (*а*) и ускорения (*б*)

Выходная мощность пьезоэлектрических преобразователей очень мала, поэтому необходимо использовать усилители с большим коэффициентом усиления и большим входным сопротивлением.

3.2.8. Тензометрические преобразователи

В основе работы тензорезисторов лежит *тензоэффект*, заключающийся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации. Характеристикой тензоэффекта материала является коэффициент относительной тензочувствительности k, определяемый как отношение изменения сопротивления к изменению длины проводника

$$k = e_R / e_l,$$

где $e_R = \Delta R / R$ — относительное изменение сопротивления проводника; $e_l = \Delta l / l$ — относительное изменение длины проводника.

Основными требованиями, предъявляемыми к материалу тензорезисторов, являются:

высокий коэффициент тензочувствительности γ, определяющий разрешающую способность преобразователя;

высокое удельное электрическое сопротивление для упрощения построения измерительных цепей;

низкий температурный коэффициент сопротивления (слабая зависимость сопротивления от температуры) в рабочем диапазоне температур;

линейная зависимость сопротивления от деформации (стабильность γ) в возможно более широком диапазоне деформаций;

химическая стойкость к материалу, обеспечивающему крепеж датчика, стойкость к окислению и механическая прочность.

При изготовлении тензорезисторов чаще других материалов применяют константан для обычных и нихром для высоких температур. Конструктивно тензорезистор (рис. 3.17, *а*) состоит из лаковой или бумажной подложки *2*, на которой при помощи связующего (клея) укреплен чувствительный элемент *1*, к нему присоединены выводные проводники *3*. Чувствительный элемент представляет собой обычно проволочную (толщина проволоки составляет 0,02...0,05 мм) петлевую решетку или ленту из фольги толщиной 0,004...0,012 мм. Сверху чувствительный элемент защищен тонкой бумагой.

Существуют так называемые пленочные тензорезисторы, получаемые вакуумной возгонкой тензочувствительного материала (например, титаноалюминиевого сплава или полупроводников германия или кремния) и последующей конденсацией его на подложку.

Важнейшим параметром чувствительного элемента, определяющим разрешающую способность датчика, является его длина (база) l, составляющая обычно 5...30 мм. Номинальное сопротивление тензодатчиков составляет 50...400 Ом, коэффициент тензочувствительности $k = 2 \pm 0{,}2$, номинальный рабочий ток 30 мА, максимально допустимые деформации не превышают $\pm 0{,}3$ %, габариты от 17×8 до 42×10 мм.

Тензорезисторы применяются для определения относительной деформации $e = \Delta l / l$ и механического напряжения $\sigma = Ee$ (где E — модуль упругости) в элементах конструкции. Для этого датчики наклеиваются на поверхность элемента, элемент подвергается нагружению, возникающие деформации элемента передаются тензорезистору. Контроль за изменением его сопротивления по времени и несложный пересчет его в деформации, перемещения, напряжения и другие параметры позволяет сравнительно просто получать достоверную информацию о напряженно-деформированном состоянии локальных областей объекта.

Текущее сопротивление тензорезистора определяется как его деформацией (естественной входной величиной) $\Delta R / R = \gamma e = \gamma \Delta l / l$ или $\Delta R = \gamma \Delta l / l$, так и приращением, возникающим при изменении температуры:

$$\Delta R_\alpha = R\alpha (T_1 - T_0),$$

где α — температурный коэффициент сопротивления; T_0 — температура, при которой проводилось уравновешивание измерительного моста.

В случае, когда температурные коэффициенты линейного расширения тензорезистора $\beta_т$ и материала испытываемого объекта $\beta_м$ не совпадают, происходит деформация чувствительного элемента за счет неодинакового температурного расширения датчика и поверхности объекта:

$$\Delta R_\beta = kR(\beta_м - \beta_т)(T_1 - T_0).$$

Во время эксперимента замеряется температура, по которой рассчитываются составляющие ΔR_α и ΔR_β систематической температурной погрешности, вычитаемые из полученного при замере значения R. Можно также контролировать изменение сопротивления тензорезистора, наклеенного на участке конструкции, имеющем ту же температуру, но не испытывающем деформаций. Показания этого тензодатчика будут содержать только систематическую температурную погрешность, которую нужно вычесть из показаний основного датчика.

Особенностью тензорезисторов является их разовое использование. Поэтому перед испытаниями они подвергаются тарированию — деформированию и нагреву конструкции с наклеенными

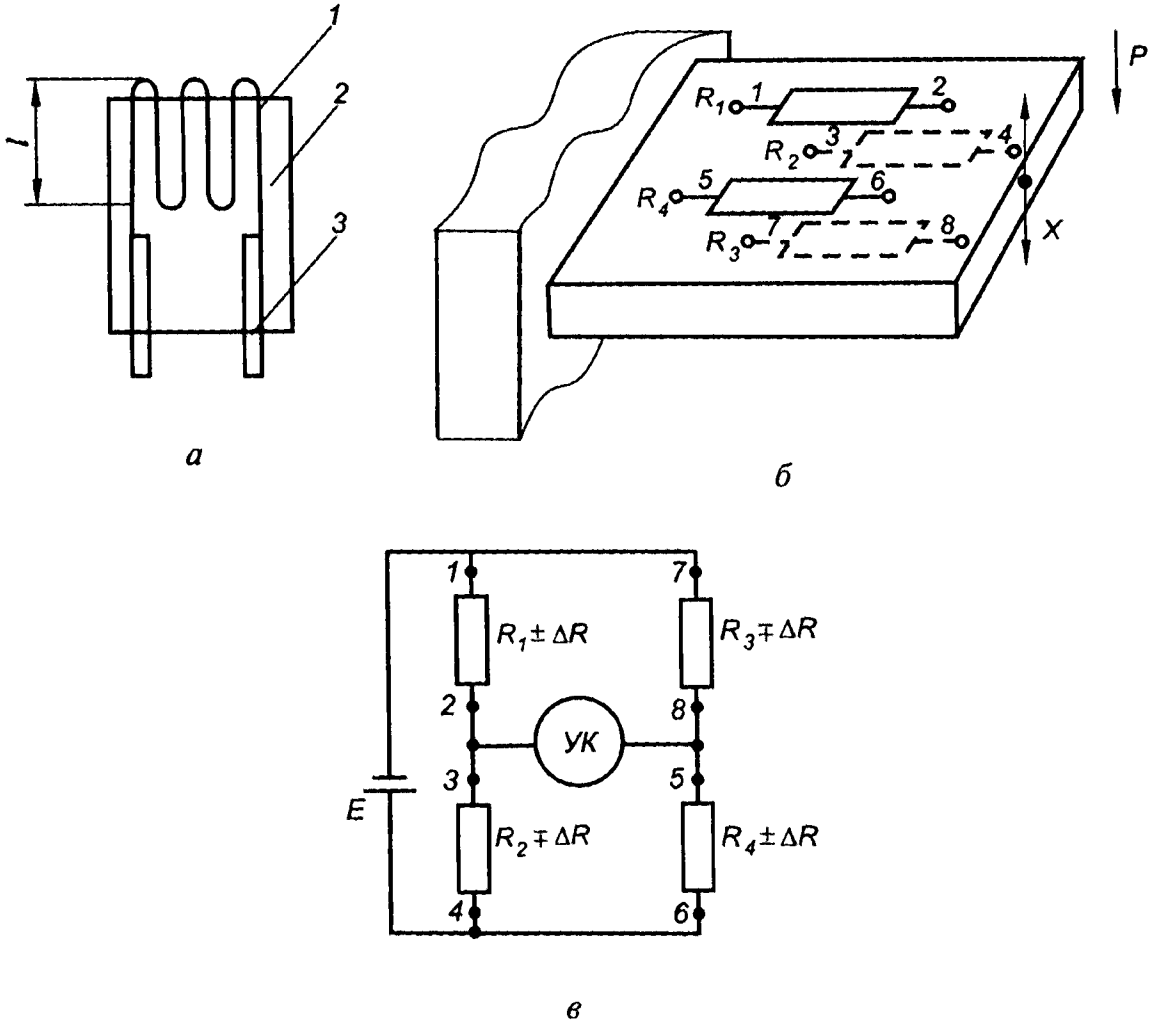


Рис. 3.17. Тензорезистор (*а*), схемы расположения тензорезисторов (*б*) и измерительной цепи (*в*)

датчиками на известную величину, замеру изменения сопротивлений и точному расчету тензочувствительности и других параметров. В случае невозможности тарирования остается пользоваться паспортными данными на партию датчиков. Поэтому в последнее время все бóльшие требования предъявляются к стабильности, воспроизводимости параметров датчиков внутри партии.

В качестве измерительных цепей для тензопреобразователей, как правило, используются неравновесные мосты, рассмотренные ранее. Схема расположения тензорезисторов при измерении деформаций изгиба пластины и схема измерительной цепи представлены на рис. 3.17, *б*, *в*.

При невозможности предварительного тарирования измерительного прибора погрешность, обусловленная разбросом характеристик датчиков и качества их монтажа, составляет 1...5 %, а общая погрешность измерительного прибора (включая погрешность усилителя и указателя) может достигать 10...15 %. Градуировкой датчиков, контролем коэффициента усиления усилителя и контро-

лем нуля указателя можно снизить погрешность измерения до 0,1 ... 0,2 % при статических и до 1 ... 1,5 % при динамических испытаниях.

Достоинствами проволочных тензодатчиков являются:

простота конструкции;

безынерционность;

линейная и симметричная при растяжении-сжатии (без гистерезиса) характеристика;

малая масса, небольшие габаритные размеры и невысокая стоимость.

К недостаткам проволочных тензодатчиков относятся:

невысокая чувствительность и необходимость применения усилителей;

чувствительность показаний к температуре;

малый диапазон деформаций (до 0,3 %);

необходимость защиты от воздействия агрессивной среды;

одноразовое использование;

значительная база (достигает — 5 ... 30 мм).

Помимо тензодатчиков, использующих тензоэффект в сплавах, существуют полупроводниковые тензодатчики, использующие изменение удельного сопротивления полупроводникового кристалла при деформации. Эти датчики обладают:

высокой тензочувствительностью (примерно в 100 раз выше, чем у проволочных);

бóльшим выходным сигналом, что позволяет обходиться без усилителя.

К недостаткам этих датчиков следует отнести:

малую механическую прочность (хрупкость);

сильное влияние окружающей температуры;

большой разброс параметров датчиков внутри партии (до 20 %).

3.2.9. Оптические преобразователи

Оптический преобразователь входной величины X_1 или X_2 (рис. 3.18) в выходную величину I содержит источник излучения, характеризующийся потоком Φ_2, некоторый оптический канал и приемник излучения, воспринимающий поток Φ_2 на выходе канала и преобразующий его в выходной электрический сигнал I. Воздействие входной величины X на поток излучения Φ_2 может осуществляться двумя путями.

В первом случае измеряемая величина X воздействует непосредственно на источник и изменяет тот или иной параметр излучения. Например, горящая сигнальная лампочка или светодиод свидетельствуют о включенном состоянии прибора. Во втором случае измеряемая величина X воздействует на оптический канал, меняя непосредственно поток Φ_2. Например, по исчезновению

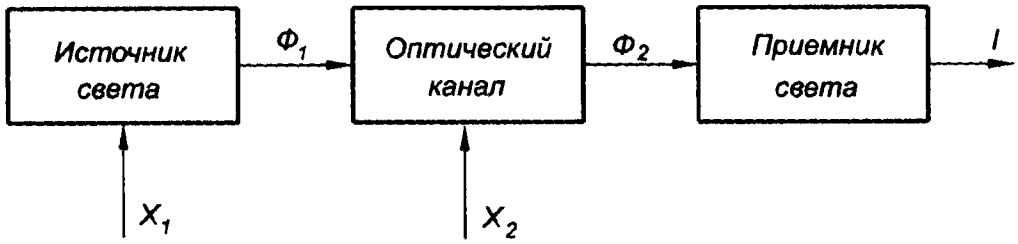


Рис. 3.18. Оптический преобразователь

потока Φ_2 при неизменном потоке Φ_1 можно судить о том, прошел человек через турникет метро или нет.

По принципу кодирования информации фотодатчики можно разделить на две группы:

- с амплитудной модуляцией, когда значение фототока пропорционально световому потоку, зависящему от контролируемой величины;
- с временной или частотной модуляцией, когда фототок изменяется дискретно за счет полного или частичного прерывания светового потока в результате воздействия контролируемой величины, о значении которой судят по числу, частоте или длительности импульсов фототока.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитное излучение в диапазоне длин волн λ от 0,003 до 300 мкм, что соответствует частотному диапазону от 10^{12} до 10^{17} Гц. Длины волн $\lambda > 0{,}8$ мкм соответствуют инфракрасному, тепловому излучению, $\lambda < 0{,}4$ мкм — ультрафиолетовому излучению, $0{,}4 < \lambda < 0{,}8$ мкм — видимому диапазону.

Свет, как любое другое электромагнитное излучение, распространяется в веществе со скоростью $v = c / n$, где $c = 2{,}998 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме; $n \geq 1$ — оптическая плотность среды (показатель преломления). Для воздуха $n = 1{,}0003$, скорость света в атмосфере практически совпадает со скоростью света в вакууме.

Источники оптического излучения бывают тепловыми и люминесцентными. В *тепловых источниках* в результате нагрева вещества часть тепловой энергии переводит атомы в возбужденное состояние, когда электроны переходят на внешние орбиты с большей энергией. Возбужденное состояние является неустойчивым, так что через некоторое время электрон излучает избыток энергии в виде кванта света (фотона), переходя при этом на одну из внутренних орбит.

Тепловым источником является лампа накаливания, состоящая из цоколя с электродами, стеклянного баллона, наполненного инертным газом, и тела накала. Если лампа служит источником излучения оптических преобразователей, то повышенные требования предъявляются к качеству стекла баллонов, к расположению и форме тела накала, которое должно быть ма-

лым по величине и равномерным по яркости. Например, спираль (тело накала) свивается таким образом, чтобы ее витки накладывались друг на друга и казались сплошным светящимся кругом.

В *люминесцентных источниках* энергия возбуждения берется атомами из нетепловых источников. При электролюминесценции электроны, разогнанные до большой скорости в электрическом поле, сталкиваются с атомами газа и возбуждают их. При катодолюминесценции разогнанные электроны возбуждают атомы твердого тела (люминесцентного слоя электронно-лучевых трубок). При фотолюминесценции атомы твердого тела поглощают кванты света, переходя в возбужденное состояние, после чего излучают кванты, но уже меньшей энергии и большей длины волны.

К люминесцентным источникам относятся газоразрядные лампы, светодиоды, оптические квантовые генераторы (лазеры). Полупроводниковый светодиод — удобный миниатюрный источник света определенной частоты, яркость которого зависит от проходящего через него тока. В качестве полупроводника используются арсенид галлия, фосфид галлия, карбид кремния, работающие при температурах не выше 70 °С.

Лазер является когерентным излучателем, т.е. все излучаемые кванты имеют одинаковую длину волны, фазу и поляризацию. Лазеры способны излучать остронаправленные интенсивные пучки света заданной длины волны. Это в свою очередь технически упрощает прием излучения (при параллельном пучке размер источника совпадает с размером приемника), что позволяет передавать излучение на большие расстояния с малыми потерями.

На практике применяют в основном газовые (гелиево-неоновая смесь), твердотельные (рубин) и полупроводниковые (арсенид галлия, кремний с примесями индия, фосфид галлия) лазеры.

Для газовых лазеров угол расходимости составляет 10′, для твердотельных — 20... 30′, для полупроводниковых — 6... 10°.

Наиболее широко распространены полупроводниковые лазеры в силу их сравнительной простоты и высокого КПД. Приемники излучения можно разделить на две группы: тепловые и фотоэлектрические.

К *тепловым приемникам* относятся термоэлементы (рис. 3.19), в которых энергия излучения преобразуется в тепловую энергию на металлическом диске *2*, покрытом слоем черни (черной краски) *1*, и оценивается термопарами *3* по температуре диска. Энергия излучения, поглощенная диском, рассеивается излучением, конвективным теплообменом с газом окружающей среды и теплопроводностью через термопары. Для уменьшения конвекции и повышения чувствительности прибора преобразователь помещают в вакуум (кварцевый или стеклянный баллон с откачанным воздухом). При снижении давления в баллоне до 10^{-6} бар (нормальное

атмосферное давление составляет 1 бар) чувствительность возрастает более чем в 10 раз. Следует отметить, что приемник поглощает обычно энергию всех падающих квантов, независимо от их длины волны, т.е. выходная величина пропорциональна интегральной, суммарной мощности излучения, падающего на приемную площадку.

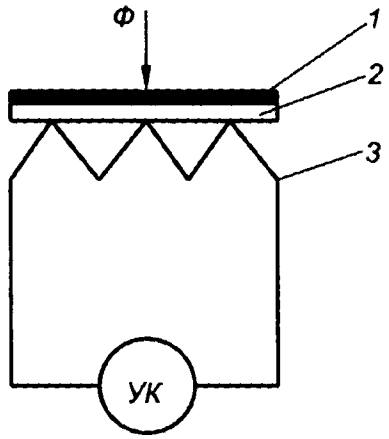


Рис. 3.19. Тепловой приемник света:
1 — слой черни; *2* — диск; *3* — термопара

Фотоэлектрические приемники (фотоэлементы) используют явление фотоэффекта: энергия квантов потока света поглощается электронами твердого тела, в результате чего они покидают свои атомы. В электрическом поле освободившиеся электроны движутся упорядоченно, т.е. возникает электрический ток. Чем больше квантов нужной энергии упадет на поверхность эмиттера, тем больше электронов покинет атомы и тем больше будет фототок.

Фотоэлементы обычно способны поглощать кванты в узком диапазоне длин волн, и их выходная величина определяется мощностью излучения на конкретной длине волны, характерной для данного фотоэлемента. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом (рис. 3.20) (вакуумные и газозаполненные фотоэлементы и фотоумножители) используют эффект выбивания квантами света электронов из катода *1*, которые под действием электростатического поля устремляются к аноду *2*, создавая фототок *I*. Катоды изготавливаются из щелочных металлов: лития, натрия, цезия, калия, рубидия. Напряжение между электродами составляет 70...300 В. Превращение светового потока в фототок практически безынерционно. Однако реактивное сопротивление цепей соединения снижает быстродействие прибора до обычного для электропреобразователей.

При высокой яркости измеряемого потока происходит эффект усталости светочувствительного слоя вследствие нехватки электронов в атомах на поверхности, способных покинуть тело при поглощении фотонов. Если яркость света была не очень велика, то световая чувствительность восстанавливается после пребывания фотоэлемента в темноте.

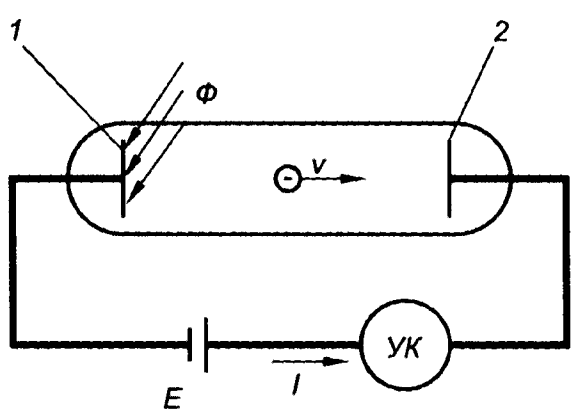


Рис. 3.20. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом:
1 — катод; *2* — анод

В вакуумных фотоэлементах электроды помещены в вакуум для исключения влияния газа на движение выбитых фотонами электронов. Это делает линейной характеристику прибора (зависимость фототока от яркости излучения).

В газонаполненных фотоэлементах электроны, выбитые фотонами, ускоряются электрическим полем и, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их, увеличивая тем самым число носителей зарядов и фототок в несколько раз (до 7) по сравнению с вакуумным фотоэлементом. Однако характеристика таких фотоэлементов нелинейна. Кроме того, эти фотоэлементы инерционны: фототок стабилизируется только через некоторое время после изменения интенсивности светового потока по мере стабилизации газового разряда.

Газонаполненные фотоэлементы применяют для световых потоков, меняющих свою интенсивность с частотой не выше сотен герц. В фотоумножителях (рис. 3.21) помимо катода *К* и анода *А* имеются вторичные катоды (эмиттеры) *Э* с системами фокусировки электронного луча. Электроны, выбитые фотонами из катода, ускоряются и при ударах о вторичные катоды *Э* выбивают дополнительные электроны так, что число электронов, уходящих с эмиттера, в 2—4 раза больше числа электронов, упавших на него, а общий коэффициент усиления (отношение числа электронов, упавших на анод, к числу электронов, вылетевших с катода) в многокаскадных фотоумножителях достигает сотен тысяч.

Напряжение питания подводится к катоду, ко всем эмиттерам и аноду через делитель напряжения так, чтобы между смежными эмиттерами было напряжение, обеспечивающее требуемый для вторичной электронной эмиссии разгон электронов.

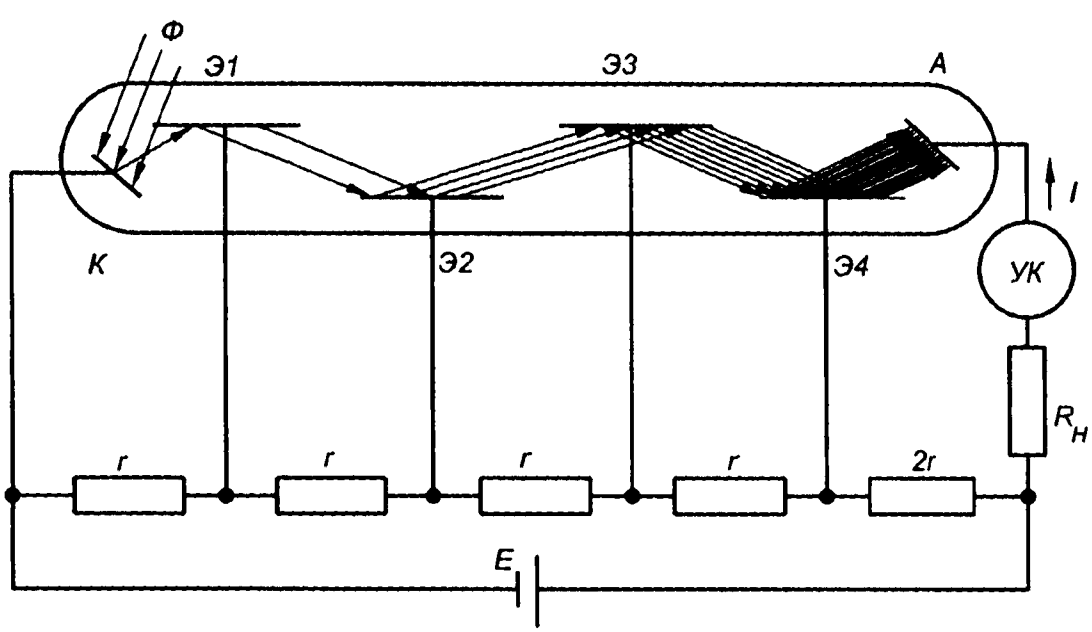


Рис. 3.21. Фотоумножитель

Характеристика фотоумножителей линейна только при малых фототоках (1 мА). Так как электроды находятся в вакууме, фотоумножитель практически безынерционен.

Преимуществами фотоэлементов, использующих внешний фотоэффект, являются:

высокая чувствительность;

линейная характеристика;

высокая температурная стабильность характеристики.

К недостаткам этих фотодатчиков следует отнести:

высокое напряжение питания (сотни и тысячи вольт);

низкую механическую прочность (хрупкость стеклянного баллона, непрочность электродов);

старение и утомляемость фотоэлементов.

В полупроводниковых фоторезисторах, состоящих из полупроводникового светочувствительного слоя толщиной около одного микрометра нанесенного на стеклянную или кварцевую пластинку, в полупроводнике (германий, индий, сернистый кадмий, сернистый свинец) под действием фотонов образуются пары электрон-дырка. Внешне это выглядит как уменьшение сопротивления резистора. В генераторных фотоэлементах (фотодиодах) помимо возникновения носителей зарядов под действием фотонов дополнительно производится их разделение, так что на зажимах фотоэлемента образуется фотоЭДС, являющаяся выходной величиной. Чувствительность полупроводниковых фотоэлементов зависит от длины волны фотонов: выпускаются фотодатчики для разных диапазонов спектра светового излучения.

Достоинствами полупроводниковых фотодатчиков являются:

высокая чувствительность;

линейная характеристика;

малая инерционность (контролируемая частота прерывания светового потока может достигать нескольких килогерц);

надежность и долговечность;

малые масса и габаритные размеры;

простота конструкции и использования, питание измерительной цепи низким напряжением.

К недостаткам полупроводниковых фотодатчиков следует отнести:

высокую чувствительность показаний к температуре окружающей среды;

утомляемость фотоэлемента.

В целом следует отметить универсальность фотодатчиков, отсутствие обратного воздействия датчика на контролируемый объект вследствие бесконтактности. Недостатками оптических датчиков является чувствительность к ударам и вибрациям, плохая работа в условиях таких оптических помех, как запыленность, загазованность, высокая влажность, помехи от осветительных приборов общего освещения. В устройствах автоматики фотодатчики использу-

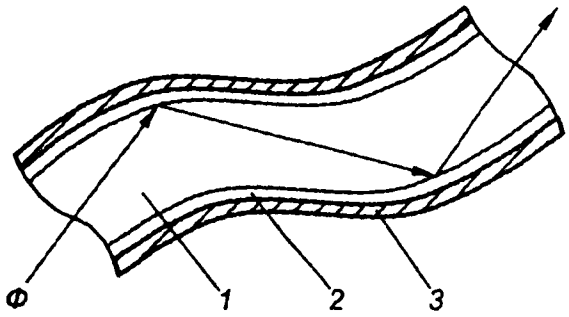


Рис. 3.22. Световод:
1 — стеклянная нить; *2* — вещество; *3* — оболочка

ются в основном как дискретные двухуровневые (есть/нет потока света), например, в устройствах считывания перфоленты (есть/нет отверстия), фотореле, когда при попадании света на фотодатчик возникает ток, замыкающий реле (турникеты метро).

С развитием полупроводниковой техники все шире применяются в качестве источника и приемника излучения свето- и фотодиоды, способы включения которых в измерительные цепи детально разработаны, а в качестве канала передачи — волоконно-оптический световод (рис. 3.22), в котором гибкая тонкая (от нескольких микрон до нескольких миллиметров) прозрачная стеклянная нить *1* помещена в оболочку из оптически менее плотного вещества *2* и в защитную оболочку *3*. Световой пучок подается на один торец световода.

Так как оптическая плотность световода выше плотности оболочки, а угол падения пучка на боковую поверхность световода близок к 90°, то происходит явление полного отражения света от поверхности. Свет распространяется вдоль искривленного волокна, что позволяет проводить оптические измерения в труднодоступных местах и на больших расстояниях.

Фотоэлектрические датчики получили очень широкое распространение в системах автоматики. Наиболее часто они используются в схемах релейного действия, где выдают сигнал «освещено» или «затемнено».

Фотореле состоит из источника и приемника излучения. Последний включен в цепь обмотки электромагнитного реле (напрямую или через усилитель). При попадании светового потока на приемник в нем возникает ток, приводящий к срабатыванию электромагнитного реле, управляющего каким-либо устройством. Такие фотореле используются для чтения перфоленты, на которой информация закодирована наличием или отсутствием отверстий в определенных местах. Перфолента протягивается сквозь ряд фотореле, и при наличии отверстий в ней в ЭВМ пойдут импульсы, соответствующие дорожкам перфоленты с отверстиями. Фотореле применяют для фиксации достижения предметом заданного положения. Например, в автоматических устройствах защиты обслуживающего персонала от производственных травм фотодатчик при попадании руки рабочего в опасную зону выдает предупредительный сигнал или выключает механизм. Линейку фотодиодов используют для определения размера детали: по числу диодов, затененных деталью, и по расстоянию между ними рассчитывает-

ся размер. Проецируя увеличенный контур детали на линейку, можно значительно повысить точность определения размера. Существуют устройства определения шероховатости поверхности по интенсивности отраженного от поверхности светового потока.

Фотодатчики используются для контроля за перемещением суппорта металлорежущих станков (рис. 3.23). Источник света направляет полосу света на прозрачный диск, на который нанесена кодовая шкала с прозрачными и непрозрачными участками. За диском расположена линейка фотодиодов. Каждому кодовому кольцу

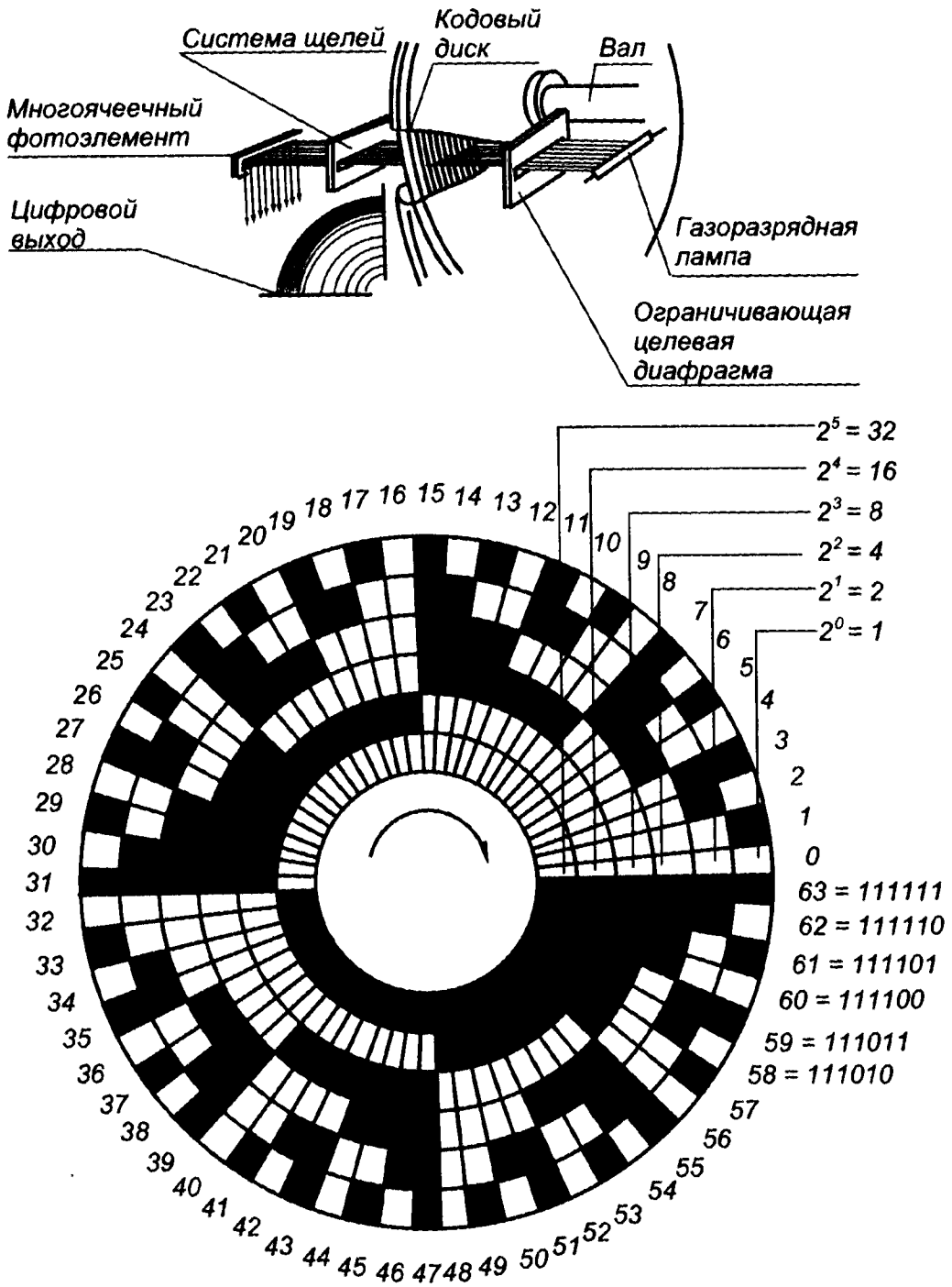


Рис. 3.23. Фотоэлектрический датчик угла поворота

диска соответствует один двоичный разряд числа, кодирующего угол поворота. Сигналы с фотоэлементов попадают на логическую схему контроля поворота диска (выходом является код угла поворота, т.е. это абсолютный датчик положения). Инкрементный датчик положения построен аналогично, но имеет всего один фотодатчик и подвижную прозрачную линейку или диск с нанесенными на них непрозрачными штрихами (до тысячи штрихов на 1 мм). При перемещении линейки или повороте диска фотоэлемент выдает импульсы, а логическая схема их считает.

В рассмотренных примерах использовался дискретный фотодатчик. Однако существуют и аналоговые датчики. Например, для измерения температур более 1500 К широко применяются яркостные пирометры, в которых температура или цвет источника света кодируется током через фотоэлемент.

3.2.10. Тепловые преобразователи

Тепловым называется преобразователь, принцип действия которого основан на тепловых процессах, а естественная входная величина которого — температура. По изменению температуры тела можно судить о тепле, полученном или отданном телом, о переходе из одного агрегатного состояния в другое и т.д.

Приборы для измерения температур по принципу действия можно разделить на группы.

Термометры расширения применяются для измерения температур в диапазоне −190...+500 °С. Принцип их действия основан на свойстве тел изменять свой объем и линейные размеры при изменении температуры.

Манометрические термометры используются для измерения температур в диапазоне от −160...+600 °С. Они построены на контроле за изменением давления жидкости, газа или пара, находящихся в замкнутом пространстве, при изменении их температуры.

Термоэлектрические пирометры применяются в температурном диапазоне −50...+2000 °С. Их работа основана на использовании термоЭДС, возникающей между двумя спаями разнородных металлов (или сплавов), когда температуры спаев различны.

Электрические термометры сопротивления обычно применяют в температурном диапазоне −200...+650 °С. Их работа основана на свойстве проводников и полупроводников изменять свое сопротивление при нагреве.

Пирометры излучения (температурный диапазон −100...+6000 °С) работают по принципу измерения излучаемой нагретыми телами энергии, изменяющейся в зависимости от температуры этих тел.

На практике в системах управления наибольшее распространение получили термоэлектрические пирометры и электрические термометры сопротивления из-за своих малых габаритов, низкой

стоимости, высокой точности и простоты включения в электрические измерительные цепи.

Термоэлектрические преобразователи, или термоэлектрические пирометры, или термопары используют явление термоэлектричества, состоящее в возникновении ЭДС и тока в цепи из двух различных проводников или полупроводников A и B (рис. 3.24, *а*), если температура θ_0 одного их соединения отличается от температуры θ_1 другого соединения.

Экспериментально доказано, что термоЭДС зависит только от материалов проводников и температуры мест их соединения и не зависит от температуры других участков цепи. ТермоЭДС не зависит также от способа, которым произведено соединение (спайкой, сваркой, скруткой и т.д). Проводники в термопаре называются термоэлектродами, а места их соединения — горячим и холодным спаями. Величина ЭДС зависит сложным образом от температур спаев и от материалов термоэлектродов

$$\mathscr{E}_{AB}(\theta_1, \theta_0) = f(\theta_1) - f(\theta_0).$$

При небольшом перепаде температур между спаями $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$ термоЭДС примерно пропорциональна разности температур: $\mathscr{E}_{AB} = S_{AB}\Delta\theta$.

На рис. 3.24, *б* приведена цепь термопары с подключенным к ней милливольтметром для измерения температуры θ_1. Если рабочий спай поместить в среду с температурой θ_1, температуру остальных спаев θ_0 поддерживать постоянной, то $f(\theta_0) = \text{const}$. При этом получается сравнительно простая зависимость термоЭДС термопары (естественной выходной величины) от температуры рабочего спая θ_1 (естественной входной величины)

$$\mathscr{E}_{AB}(\theta_1, \theta_0) = f(\theta_1) - Q.$$

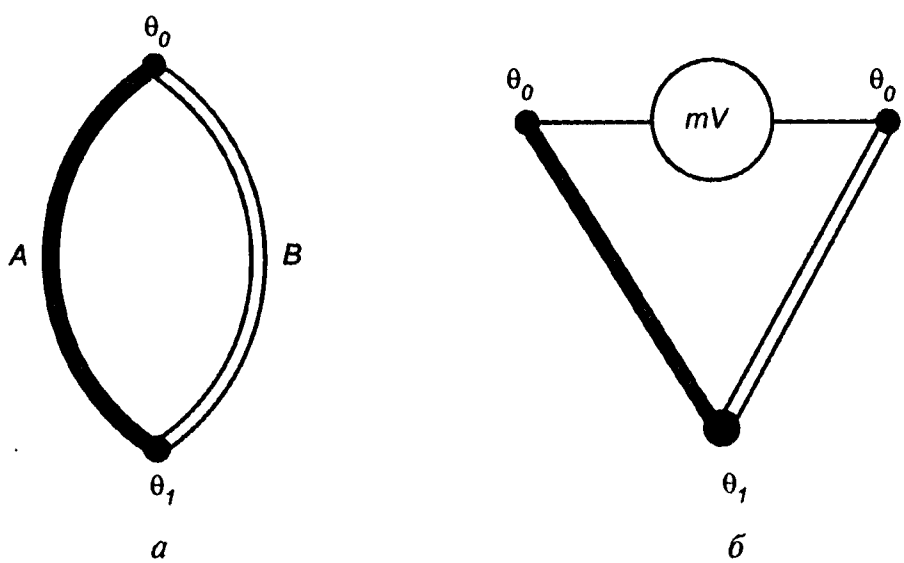


Рис. 3.24. Термоэлектрический пирометр

Ниже приведены термоЭДС, которые развиваются различными термоэлектродами в паре с платиной при температуре рабочего спая $\theta_1 = 100$ °С и температуре нерабочих спаев $\theta_0 = 0$ °С.

Материал	ТермоЭДС, мВ
Хромель	+2,4
Нихром	+2,2
Медь	+0,76
Серебро	+0,72
Платинородий	+0,643
Платина	0
Никель	−1,5
Алюмель	−1,6
Константан	−3,4
Копель	−4,5

Для увеличения уровня полезного сигнала стремятся при изготовлении термопары так выбрать материалы термоэлектродов, чтобы один из них развивал с платиной положительную термоЭДС, а другой — отрицательную. Тогда в паре они дадут большую термоЭДС и большую разрешающую способность измерительного прибора.

На рис. 3.25 приведены термоЭДС различных сплавов в паре с платиной. Видно, что наибольшую термоЭДС развивают хромель-копелевые термопары (при 100 °С $\mathscr{E} = 6,9$ мВ). Для повышения выходной термоЭДС несколько термопар соединяют последовательно в батарею (см. рис. 3.15), так что результирующая ЭДС будет равна сумме термоЭДС отдельных термопар. Выходной величиной термоэлектрического пирометра является непрерывно меняющееся напряжение, поэтому эти датчики являются аналоговыми генераторными.

Холодный спай термопары должен иметь постоянную температуру, лучше всего 0 °С, так как тарировочные данные термопар приводятся именно для этой температуры. Это требует выноса холодного спая из рабочей зоны, что не всегда возможно: термоэлектроды реальной термопары имеют ограниченную длину, гибкость и прочность (толщина проводов стандартных термопар составляет 0,05...0,5 мм). Горячий спай термопары работает в условиях более жестких, чем линия связи горячего и холодного спаев и сам холодный спай (высокие температуры, коррозия и т.д).

Использование длинных прочных термоэлектродов из благородных металлов, которые часто применяются для изготавливания термопар, экономически невыгодно. Поэтому термоэлектроды горячего спая термопары A и B (рис. 3.26) удлиняются соединительными термоэлектродами A_1, B_1 из дешевых металлов, которые и соединяются холодным спаем, помещенным в сосуд со льдом.

Чтобы термоЭДС термопары не изменилась, к материалу удлинительных термоэлектродов предъявляются два требования. Во-

первых, удлинительные термоэлектроды должны быть термоэлектрически идентичны основным электродам термопары, т.е. должны давать ту же термоЭДС в заданном диапазоне температур спаев. Во вторых, места присоединения удлинительных термоэлектродов к основным должны иметь одинаковую температуру θ_2. Например, для термопары платинородий-платина применяют удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП, дающие ту же термоЭДС в интервале температур до 150 °С.

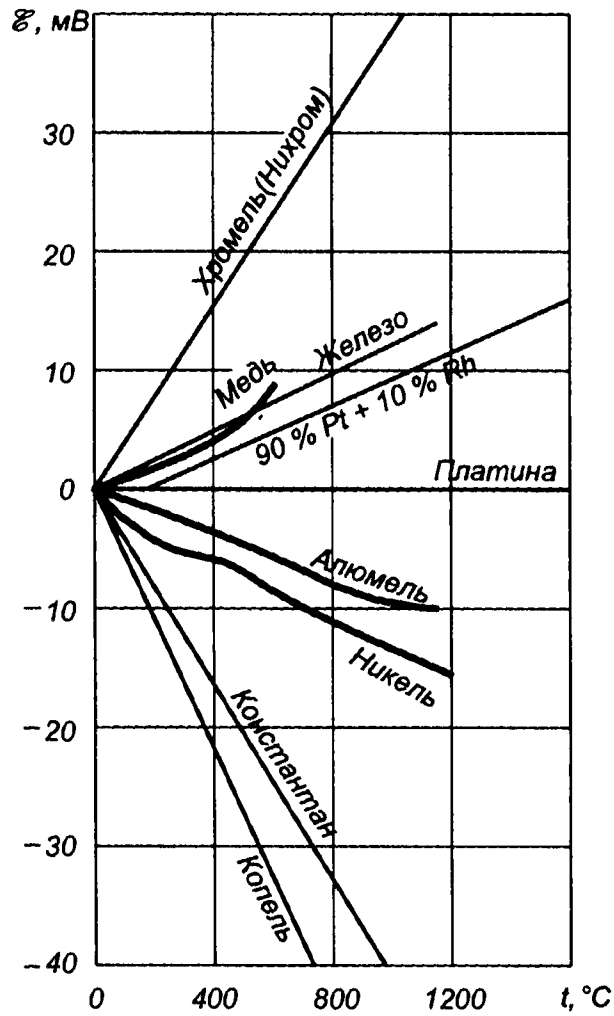


Рис. 3.25. ТермоЭДС различных металлов в паре с платиной при температуре холодного спая 0 °С

Для термопар хромель-алюмель и хромель-копель применяют удлинительные электроды из меди и константана низкой стоимости. В паспорте на термопару приводятся градуировочные данные для температуры холодного спая 0 °С. Зависимость термоЭДС от температуры в широком диапазоне температур нелинейна. Если термопара используется при другой температуре нерабочих спаев, необходимо вводить поправку, вычисляемую по формуле

$$\Delta\theta = k(\theta_1)\Delta\theta_0,$$

где $\Delta\theta$ — поправка при вычислении температуры горячего спая; $k(\theta_1)$ — коэффициент, зависящий от температуры горячего спая θ_1 (зависимость $k(\theta_1)$ приводится в паспорте термопары); $\Delta\theta_0$ — отклонение температуры холодного спая от 0 °С.

Мощность сигнала от термопары очень мала, поэтому для измерения термоЭДС применяют милливольтметры с большим входным сопротивлением или специальные приборы — низкоомные компенсаторы, настроенные на точное измерение напряжения от термопар в диапазоне до 100 мВ и использующие принцип уравновешивания, когда напряжение от термопары полностью компенсируется напряжением прибора, а ток в измерительной цепи и потери в ней равны нулю.

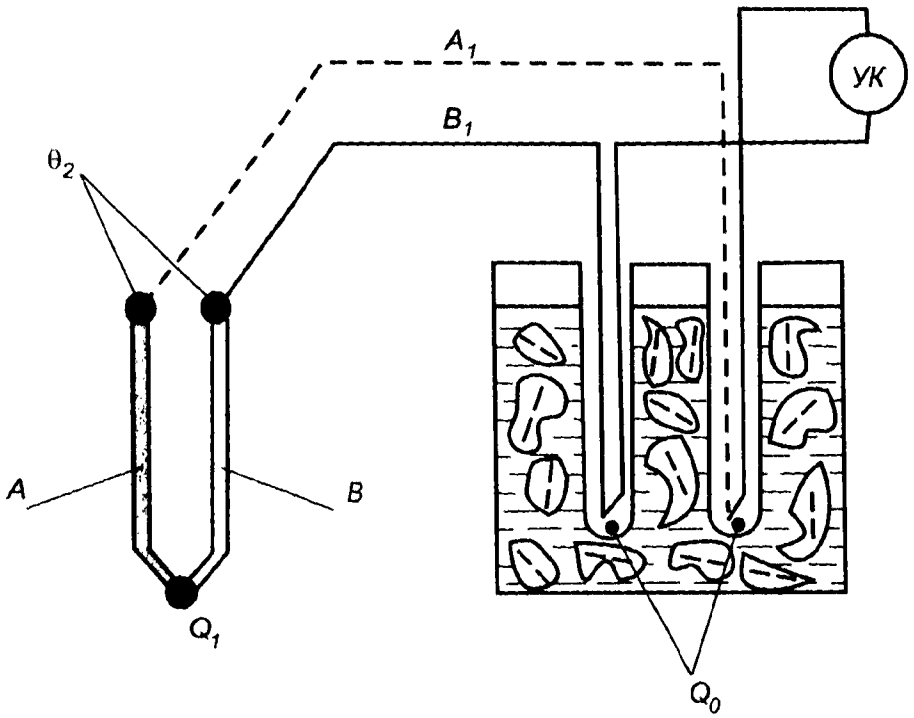


Рис. 3.26. Схема включения термопары

Термоэлектрический метод измерения температур обладает относительно высокой точностью. Погрешность термоЭДС за счет неоднородности материала термоэлектродов составляет 10...100 мкВ (несколько процентов).

Основные стандартизованные типы термопар приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Тип термопары	Материал термоэлектродов	Предел измерений при длительном применении, °С	Предел измерений при кратковременном применении, °С
ТПП	Платинородий (10 % родия — платина)	20...1300	1600
ТПР	Платинородий (30 % родия) — платинородий (6 % родия)	300...1600	1800
ТХА	Хромель-алюмель	50...1000	1300
ТХ	Хромель-копель	50...600	800
ТНС	Сплав НК-СА	300...1000	—

Платинородий-платиновые термопары имеют наивысший температурный предел (до 1800 °С) и небольшую величину развиваемой термоЭДС, поэтому применяются преимущественно для измерения температур более 1000 °С. Для измерения температур в

диапазоне 600... 1000 °С наиболее широко применяются хромель-алюмелевые термопары. Для измерения температур до 600 °С широко применяются термопары с хромель-копелевыми электродами, развивающие самую высокую термоЭДС. Однако эти термопары имеют существенно нелинейную характеристику по сравнению с хромель-алюмелевой термопарой. При использовании термопары из сплава НК-СА не требуется учета температуры холодного спая, так как термоЭДС этих сплавов при температурах меньше 200 °С практически постоянна и равна нулю.

Термопары незаменимы в случаях, когда требуется измерить температуру в локальной зоне (горячий спай термопары имеет диаметр доли миллиметра). Кроме того, для измерения температур в диапазоне 700... 2000 °С им практически нет альтернативы.

Основным вопросом при конструировании термопар промышленного типа является выбор материала защитного корпуса, в котором монтируется чувствительный элемент — горячий спай термопары, и материала изоляции термоэлектродов. Защитный корпус должен оградить термопару от действия горячих химически активных газов и жидкостей. Поэтому он должен быть герметичен, хорошо проводить тепло, быть механически прочным и устойчивым к воздействию температуры и активной среды. Кроме того, он не должен выделять при нагреве газов, разрушающих термопару.

Чаще всего корпус изготавливают из обычной (для температур до 600 °С) или легированной (для температур до 1100 °С) стали. Для температур до 1400 °С корпус изготавливают из кварца и фарфора, однако эти материалы дороги и механически непрочны.

Ниже перечислены материалы, которые применяют в качестве изоляции термоэлектродов.

Материал изоляции	**Предельная температура, °С**
Шелк	120
Теплостойкая резина	150
Эмаль	200
Асбест	300
Кварцевые трубки или бусы	1000
Фарфоровые трубки или бусы	1400

3.2.11. Терморезисторы

Известно, что большинство металлов и полупроводников меняют при нагреве электрическое сопротивление. Химически чистые металлы, как правило, обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), т.е. с ростом температуры их сопротивление растет. В интервале температур 0... 100 °С ТКС составляет 0,35... 0,68 %/К.

Для измерения температур используются материалы, обладающие:

- большим ТКС;
- стабильным по времени ТКС;
- линейной зависимостью сопротивления от температуры (постоянным по температуре ТКС);
- большим удельным сопротивлением;
- хорошей воспроизводимостью (малым разбросом свойств термосопротивлений при изготовлении);
- устойчивостью к воздействиям окружающей среды.

В первую очередь таким требованиям удовлетворяет платина. Из-за низкой стоимости получили широкое распространение термосопротивления из меди, вольфрама и никеля.

Зависимость сопротивления платиновых терморезисторов от температуры выражается соотношениями:

в диапазоне 0...650 °С

$$R_T = R_0(1 + A\theta + B\theta^2),$$

где R_0 — сопротивление терморезистора при 0 °С; $A = 3{,}96847 \cdot 10^{-3}$ 1/К (для проволоки, используемой при изготовлении терморезисторов); θ — температура °С; $B = -5{,}847 \cdot 10^{-7}$ 1/К^2;

в диапазоне −200... 0 °С

$$R_T = R_0\left[1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100)^3\right],$$

где A и B — те же; $C = -4{,}22 \cdot 10^{-12}$ 1/К^3.

Для медного терморезистора в интервале температур −50 ... +180 °С можно пользоваться зависимостью

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_T - R_0}{R_0} = a\theta$$

или

$$\Delta R = R_T - R_0 = R_0 a\theta,$$

или

$$R_T = R_0(1 + a\,\theta) = R_0(1 + \theta/\theta_0),$$

где $a = 4{,}26 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\theta_0 = 1/a = 234{,}7$ °С.

Если бы формула была верна для любых температур, то при $\theta = -234{,}7$ °С возникла бы сверхпроводимость ($R = 0$), чего в реальности не происходит.

Сопротивление медного терморезистора R_{T_2} при температуре θ_2 и известном сопротивлении R_{T_1} вычисляется по формуле

$$R_{T_2} = R_{T_1}\frac{R_0(1 + a\,\theta_2)}{R_0(1 + a\,\theta_1)} = R_{T_1}\frac{(\theta_0 + \theta_2)}{(\theta_0 + \theta_1)}.$$

Дешевые медные терморезисторы можно применять до температур порядка 200 °С в атмосфере, свободной от влажности и корроди-

рующих газов. При введении нелинейной температурной поправки их можно использовать для измерения температур вплоть до 260 °С.

Промышленные платиновые терморезисторы работают в диапазоне температур 200...650 °С (известны случаи использования их при температурах 264...1000 °С).

Никелевые терморезисторы обладают высоким сопротивлением и, как следствие, высокой разрешающей способностью, однако при температурах выше 100 °С их характеристика становится нелинейной, а при 300 °С и выше ТКС становится неоднозначным. Медные и никелевые терморезисторы выпускают в стеклянной герметизирующей изоляции, что повышает стабильность их характеристик и коррозионную стойкость.

Вольфрамовые терморезисторы применяют до температур порядка 400 °С (при более высоких температурах металл окисляется). Некоторые характеристики основных металлов, применяемых при изготовлении терморезисторов, приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Материал	ТКС (0...100 °С)	Удельное сопротивление при 20 °С, Ом·мм/м	Температура плавления, °С
Платина	0,039	0,105	1773
Медь	0,00427	0,017	1083
Никель	0,0069	0,08	1455
Вольфрам	0,0048	0,055	3410

Термометры сопротивления являются одними из наиболее точных преобразователей температуры. Так, платиновые терморезисторы позволяют измерять температуру с погрешностью порядка 0,001 °С.

Выпускают промышленные проволочные терморезисторы (термометры сопротивления) двух типов: платиновые ТСП и медные ТСМ. Их характеристики приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Тип	Диапазон температур, °С	Класс точности	Формула для расчета погрешности
ТСП	−200...0	I	$\pm(0{,}15...3)10^{-3}\lvert\theta\rvert$
	0...650		$\pm(0{,}15...4{,}5)10^{-3}\theta$
ТСП	−200...0	II	$\pm(0{,}30...4{,}5)10^{-3}\lvert\theta\rvert$
	0...650		$\pm(0{,}30...6)10^{-3}\theta$
ТСМ	−50...180	II	$\pm(0{,}30...3{,}5)10^{-3}\lvert\theta\rvert$
		III	$\pm(0{,}30...6)10^{-3}\lvert\theta\rvert$

Чувствительный элемент термометра сопротивления, выполненный в виде спирали или катушки на слюдяном (ТСП) или пластмассовом (ТСМ) каркасе, помещен в герметический корпус из металлической гильзы с резьбовым штуцером и головкой с че-

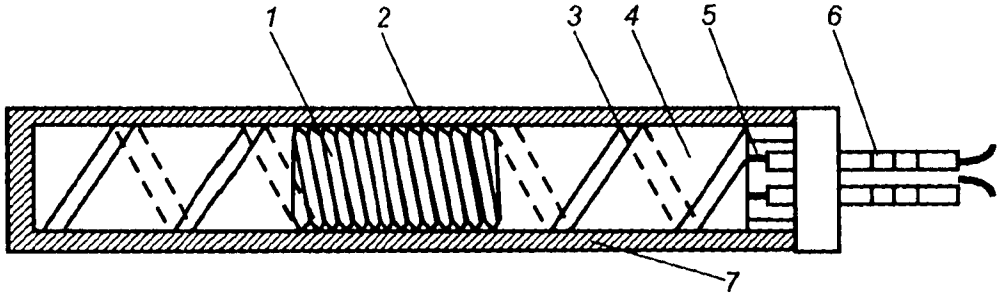


Рис. 3.27. Платиновый термометр сопротивления:
1 — проволока; *2* — пластина; *3* — серебряная полоска; *4* — слюдяные накладки; *5* — катушка; *6* — серебряные выводы; *7* — защитный чехол

тырьмя выводами для подключения к измерительной цепи двух-, трех- или четырехпроводной линией.

Платиновые термометры ТСП изготавливаются с сопротивлением при 0 °С R_0 = 10 Ом (так называемая градуировка 20) для измерения температур 0...650 °С, и с R_0 = 46 Ом и R_0 = 100 Ом для температур от 200... 500 °С.

Медные термометры ТСМ изготавливаются с R_0 = 53 Ом или R_0 = 100 Ом для измерения температур в диапазоне −50... +180 °С.

На рис. 3.27 приведено устройство платинового термометра сопротивления. Платиновая проволока *1* намотана на слюдяную пластину *2* с нарезкой. Снаружи проволока накрыта слюдяными накладками *4* и закреплена серебряной полоской *3*. Катушка *5* и серебряные выводы *6* помещены в металлический защитный чехол *7*.

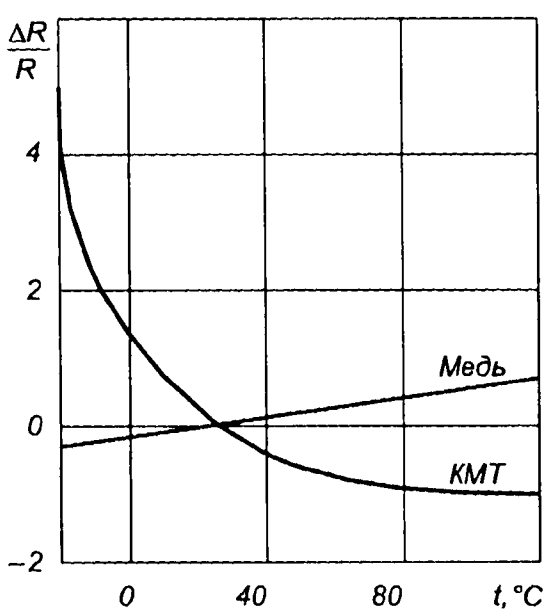


Рис. 3.28. Зависимость сопротивления от температуры для кобальтово-марганцевого термистора типа КМТ и медного терморезистора

Полупроводниковые терморезисторы (термисторы) из германия, индия, смеси меди с марганцем (тип ММТ), смеси кобальта с марганцем (тип КМТ) обладают по сравнению с металлическими терморезисторами меньшими габаритными размерами и большим ТКС. Рабочий температурный диапазон составляет −60... +300 °С. С ростом температуры сопротивление падает ($\alpha < 0$), причем зависимость сопротивления от температуры существенно нелинейна.

На рис. 3.28 для сравнения приведена температурная зависимость для меди и полупроводника, хорошо аппроксимируемая формулой

$$R_T = A \exp\{B/\theta\},$$

где A — коэффициент, имеющий размерность сопротивления; B — коэффициент, имеющий размерность температуры; θ — абсолютная температура в К.

Коэффициенты A и B, как правило, не зависят от температуры и определяются экспериментально.

Если A и B неизвестны, но известны R_1 и R_2 при температурах θ_1 и θ_2, то для температуры θ

$$R_T = R_1 \exp\left\{B\left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_1}\right)\right\},$$

где $B = \dfrac{\theta_1\theta_2}{\theta_1 - \theta_2} \ln \dfrac{R_1}{R_2}$.

Полупроводниковые терморезисторы имеют номинальное сопротивление в диапазоне 0,33...1000 кОм, предельная рабочая температура медно-марганцевых термисторов (ММТ) — 120 °С, кобальтово-марганцевых термисторов (КМТ) — 180 °С.

Основным недостатком полупроводниковых терморезисторов (помимо нелинейной характеристики) является значительный разброс от образца к образцу как номинального сопротивления (±20 %), так и постоянной В (±17 %). Это требует индивидуальной градуировки преобразователей, что затрудняет их массовое использование.

Конструктивное исполнение терморезисторов может быть различным. Металлические терморезисторы часто выполняют подобно тензорезисторам (см. рис. 3.17, *а*) в виде высокотеплопроводной подложки *1*, чувствительного элемента из медной или платиновой проволоки *2* и выводных электродов *3*.

Серийно выпускаемые полупроводниковые терморезисторы внешне подобны обычным высокоомным резисторам. Они состоят из полупроводникового стержня (или таблетки), покрытого краской или герметичной металлической или стеклянной оболочкой диаметром 3...7 мм и металлических выводных проводников. На рис. 3.29 приведены примеры конструкций термисторов, состоящих из полупроводникового стержня *1*, контактных колпачков *2* с токоотводами *3*. Стержень *1* часто защищается фольгой *4* и стеклянным изолятором *6* и помещается в корпусе *5*.

В качестве измерительных цепей для термосопротивлений, как правило, используют обычные неравновесные мосты. Во избежание нагрева чувствительного элемента измерительным током напряжение питания моста выбирается в диапазоне 1,5...5 В, обеспечивающее ток через элемент порядка нескольких миллиампер.

Особенностью металлических термосопротивлений является сравнительно узкий диапазон изменения и малое сопротивление

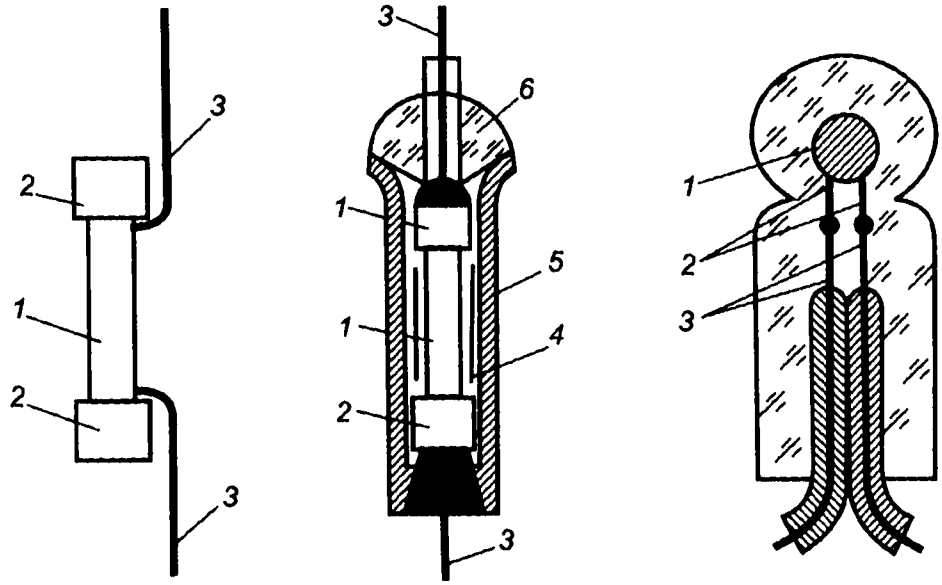


Рис. 3.29. Конструкции термисторов:
1 — стержень; *2* — контактный колпачок; *3* — токоотвод; *4* — фольга; *5* — корпус; *6* — стеклянный изолятор

чувствительного элемента, что требует учета сопротивления соединительных проводов и изменения при их нагреве. Например, если используется медный терморезистор с сопротивлением $R_{тр}$ = = 53 Ом совместно с медной соединительной линией сопротивлением $R_л$ = 5 Ом, то изменение общего сопротивления цепи

$$\Delta R_S = \left(R_{тр.об} + R_{л.об}\right)\alpha\,\theta = R_{тр.об}\,\alpha\,\theta + R_{л.об}\,\alpha\,\theta = \Delta R_{тр} + \Delta R_л.$$

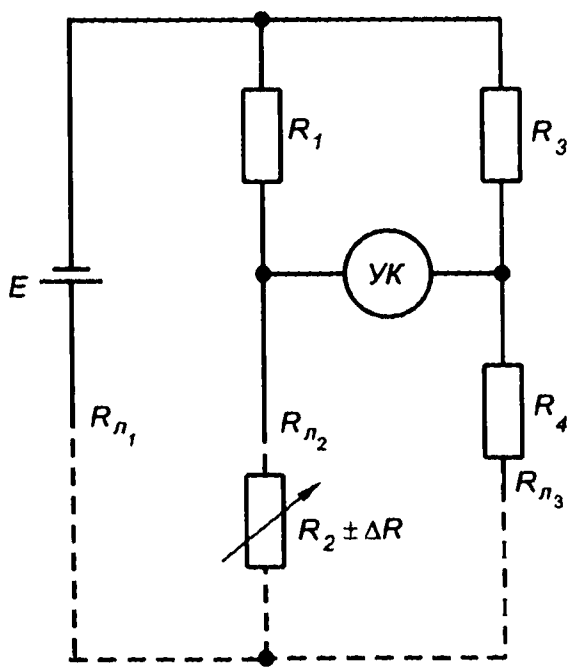


Рис. 3.30. Схема включения терморезистора

Относительная погрешность за счет нагрева линии составит $\Delta R_л/\Delta R_{тр}$ = 5 Ом/53 Ом, т. е. около 10 %.

Уменьшение погрешности за счет сопротивления линии возможно путем включения их по четырехпроводной линии связи, соединяющей чувствительный элемент с измерительным мостом. На рис. 3.30 приведена схема включения терморезистора R_2, когда сопротивления проводов $R_{л_2}$ и $R_{л_3}$ одинаково влияют на сопротивление плеч моста R_2 и R_4, компенсируя друг друга (сопротивление линии питания $R_{л_1}$ вызывает незначительные потери электроэнергии и не влияет на работу измерительного моста).

3.3. Усилители

Усилители — это преобразователи, предназначенные для усиления слабого сигнала от датчика (порядка $10^{-4}...10^{-5}$ Вт) до уровня, требуемого для его обработки, и усиления маломощного управляющего сигнала до мощности, необходимой для управления исполнительным устройством системы (порядка 10^3 Вт) за счет внешнего источника энергии. По виду используемой энергии усилители, как и другие преобразователи, делят на электрические, гидравлические и пневматические.

В группу *электрических усилителей* входят электронные, магнитные, электромашинные и другие устройства, изменяющие параметры электрического сигнала. Усиление происходит за счет использования энергии стороннего источника питания: гидронасоса, пневмосети и в конечном счете электросети.

В ряде случаев усилители наряду с функцией усиления мощности выполняют функцию преобразования сигнала в другой вид, более удобный для работы системы управления (например, золотниковый гидрораспределитель с электромагнитным приводом).

Усилители выполняются как самостоятельные элементы либо входят в состав измерительных или исполнительных устройств и являются в этом случае их неотъемлемой частью. Как и другие элементы систем управления, усилители характеризуются статическими и динамическими характеристиками, перечисленными ранее.

Основными параметрами усилителей помимо коэффициента усиления (по току, напряжению, мощности) постоянной времени (инерционность) и рабочего диапазона частот являются:

- линейность статической характеристики;
- величина зоны нечувствительности;
- энергетические параметры (входная, выходная и потребляемая мощность);
- стабильность параметров при изменении условий внешней среды и по времени и их воспроизводимость при серийном производстве;
- долговечность, надежность, вибростойкость и т.д.

Возможный коэффициент усиления по мощности усилителей, применяемых в системах управления, лежит в диапазоне от 10 до 10^7. Выходная мощность усилителей, применяемых в системах управления, лежит в пределах от долей ватт до десятков киловатт. При мощности до 100 Вт обычно применяют электронные усилители, при большей требуемой мощности — гидро- и пневмоусилители.

Так как слабый сигнал от датчика или сравнивающего органа на пути до исполнительного устройства претерпевает серию преобразований и усиливается в миллионы раз, усиление происхо-

дит в несколько этапов, а сами усилители строят часто многокаскадными, состоящими в свою очередь из нескольких соединенных последовательно усилителей.

Важной характеристикой являются величина запаздывания и инерционность усилителя. Обычно можно считать безынерционными электронные усилители, гидравлические золотники, струйные реле. Наибольшим запаздыванием обладают магнитные и гидроусилители.

Усилители представляют обычно инерционным звеном первого порядка, характеризуемым передаточным коэффициентом (коэффициентом усиления усилителя) и постоянной времени. Динамические характеристики усилителей основных классов приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Вид усилителя	Основное применение усилителя	Коэффициент усиления по мощности	Постоянная времени, с
Полупроводниковые	Усилительный каскад на постоянном токе	$10^3 \ldots 10^5$	$10^{-6} \ldots 10^{-7}$
	Усилительный каскад на переменном токе	$10^4 \ldots 10^6$	$10^{-2} \ldots 10^{-2}$
	Оконечный усилитель мощности	$10^2 \ldots 10^3$	$10^{-2} \ldots 10^{-4}$
Магнитные	Усилительный каскад на переменном токе	$10^3 \ldots 10^5$	$10^{-1} \ldots 10^{-4}$
Электромашинные	Оконечный усилитель мощности	$10^2 \ldots 10^4$	$1 \ldots 10^{-2}$
Гидравлические	Дроссельные	$10^4 \ldots 10^6$	$10^{-1} \ldots 10^{-2}$
	Струйные	$10^3 \ldots 10^4$	$10^{-1} \ldots 10^{-2}$
Пневматические	Дроссельные	$10^5 \ldots 10^7$	$10^{-2} \ldots 10^{-3}$
	Струйные	$10^3 \ldots 10^5$	$10^{-3} \ldots 10^{-4}$

3.3.1. Электронные усилители

Особенностью электронных усилителей является их способность усиливать маломощные сигналы порядка 10^{-6} Вт при напряжениях порядка 10^{-3} В, поэтому в системах управления их применяют в основном в маломощных цепях для обработки сигналов от датчиков, для согласования элементов системы управления по уровню или мощности сигналов, для выработки управляющего сигнала. По выходной мощности эти усилители уступают гидро- и пневмоусилителям тех же габаритов, поэтому для управления исполнительными устройствами они применяются не так широко.

По соотношению входного сопротивления усилителя $Z_{вх}$ и выходного сопротивления источника сигнала Z_c усилители делятся:

на усилители напряжения — $Z_{вх} \geq 100$ МОм $>> Z_с$, ток во входной цепи усилителя $I_{вх} \approx 0$ (источник работает в режиме холостого хода), усилитель практически не влияет на процессы в источнике (например, применяется для усиления сигналов с делителей напряжения типа неравновесных мостов);

усилители тока — $Z_{вх} << Z_с$, источник сигнала работает в режиме, близком к короткому замыканию, ток во входной цепи усилителя $I_{вх}$ задается источником;

усилители мощности — $P = IU$: $Z_{вх} \approx Z_с$, ток и напряжение на входе усилителя определяются как источником сигнала, так и усилителем.

При проектировании цепи управления следует уделить внимание согласованию звеньев цепи по их входным и выходным сопротивлениям.

В настоящее время в основном применяются полупроводниковые усилители благодаря их малым габаритам, низкой потребляемой мощности и высокой надежности. Работа полупроводникового усилителя основывается на возможности управления током от эмиттера к коллектору транзистора путем изменения напряжения на базе. На рис. 3.31 приведена схема простейшего усилителя напряжения с общим эмиттером. Схема питается от источника, плюсовой контакт которого соединен с землей, а минусовой при помощи делителя R_1, R_2 устанавливает режим работы транзистора. Выходная цепь представляет собой делитель, в первом из плеч которого стоят $R_э$ и транзистор, во втором — $R_к$. Выходное напряжение снимается с первого плеча делителя. В зависимости от входного напряжения меняется ток $I_к$ через $R_э$, $R_к$ и выходное напряжение $U_{вых}$ как падение напряжения на $R_э$ и транзисторе:

$$U_{вых} = E_п - I_к R_к.$$

При закрытом транзисторе $I_к = 0$, падение напряжения на $R_к$ равно нулю и $U_{вых} = E_п$. При открытом транзисторе

$$I_к = \frac{E_п}{R_э + R_к} \text{ и } U_{вых} << E_п.$$

На рис. 3.32 представлена схема двухкаскадного усилителя тока, оба каскада которого соответствуют рис. 3.31.

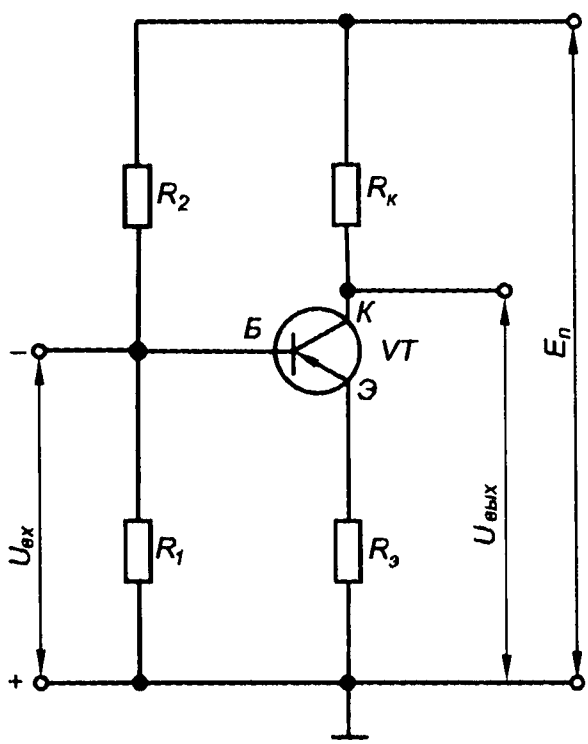


Рис. 3.31. Усилительный каскад с общим эмиттером

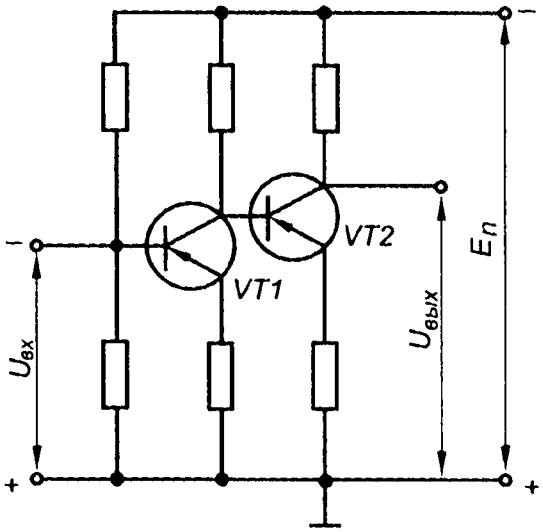


Рис. 3.32. Двухкаскадный усилитель

Такой усилитель имеет коэффициент усиления 30...200.

Основными характеристиками усилителей являются уровень собственных шумов и пороговая чувствительность — минимальное значение входного сигнала, при котором выходной сигнал можно отличить от собственных шумов с заданной вероятностью P (при $P = 0{,}98$ сигнал на выходе должен превышать шум в 3 раза).

Источником собственных шумов являются электромагнитные наводки, уменьшить которые можно экранированием, а также тепловые шумы и шумы усилительных элементов. Особенно вредны шумы во входной цепи и первом каскаде усиления усилителя, где их уровень соизмерим с уровнем полезного сигнала. Шумы усиливаются следующими каскадами усилителя вместе с полезным сигналом и передаются на выход усилителя.

Современные усилители кроме своей основной функции обычно осуществляют также фильтрацию входного сигнала, оставляя в нем только представляющие интерес для анализа частотные составляющие и удаляя помехи (например, наводки от электросети с частотой 50 Гц).

Различают следующие типы транзисторных усилителей:

усилители переменного тока, которые управляют мощностью переменного тока рабочей частоты (например, 50 Гц), подаваемого на электродвигатель синхронный или асинхронный;

усилители с импульсной модуляцией, предназначенные для усиления мощности импульсов, управляющих электромагнитными распределителями в гидро- и пневмоприводах, электромагнитными муфтами, шаговыми электродвигателями, электродвигателями, работающими в импульсном режиме, и т.д. (эти усилители также относятся к группе усилителей переменного тока);

усилители постоянного тока, предназначенные для усиления сигналов постоянного тока от датчиков, управления электромагнитными реле, согласования элементов системы управления по току и напряжению.

3.3.2. Магнитные усилители

Работа магнитных усилителей основана на особенностях свойств ферромагнитных материалов. Если по обмотке, расположенной на сердечнике, идет ток, то индуцированное им магнитное поле,

характеризуемое напряженностью H, взаимодействует с атомами материала сердечника и вызывает намагничивание сердечника, магнитный поток и магнитную индукцию B. На электромагнитные процессы влияет не сама напряженность магнитного поля H, а результат его взаимодействия с материалом сердечника — магнитная индукция B, которая может быть больше или меньше H. Другими словами, магнитное поле может усиливаться или ослабляться средой в зависимости от ее свойств.

Отношение приращения индукции B к приращению напряженности магнитного поля H называется *абсолютной магнитной проницаемостью материала* $\mu_0 = \Delta B/\Delta H$ и составляет для ферромагнетиков десятки тысяч. В случае небольшой напряженности поля H магнитная проницаемость постоянна и $B = \mu_0 H$.

Принято считать, что материал достиг состояния насыщения при напряженности насыщения H_S и индукции насыщения B_S, когда с ростом H не происходит роста B, а $\mu_0 = \Delta B/\Delta H = 0$, что объясняется исчерпанностью возможности материала реагировать на усиление поля. Кривая зависимости магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H для ферромагнетиков имеет вид характеристики с петлей гистерезиса (см. рис. 3.2, *д*), где X и Y соответствуют H и B. При уменьшении H до нуля и росте в обратном направлении кривая $B(H)$ пройдет чуть левее за счет остаточных явлений в материале сердечника, при обратном изменении H — аналогично, но правее.

Схема простейшего магнитного усилителя представлена на рис. 3.33, *а*. Магнитный усилитель состоит из двух дросселей *I* и *II*, охваченных обмоткой подмагничивания *2*. Обмотки *1* и *3* переменного тока обоих дросселей намотаны на сердечники так, что переменные магнитные потоки внутри обмотки постоянного тока *2* имеют противоположные направления и компенсируют друг друга, не вызывая в обмотке *2* переменной ЭДС. Входной величиной усилителя является напряжение E на обмотке подмагничивания *2*, выходной величиной является переменный ток $I_н$ в обмотках *1* и *3* и нагрузке $R_н$ и напряжение

$$U_н = I_н R_н,$$

где $I_н = \dfrac{U}{Z} = \dfrac{U}{\sqrt{(R_1 + R_2 + R_н)^2 + \omega^2 (L_1 + L_2)^2}}$ — переменный ток;

R_1, R_2 — активные сопротивления обмоток *1* и *2*; ω — частота переменного напряжения U; L_1, L_2 — индуктивности обмоток *1* и *2*.

При росте тока подмагничивания возрастет постоянное магнитное поле, материал сердечника приближается к состоянию насыщения, его магнитная проницаемость μ_0 уменьшается. Индуктивности L_1, L_2 и реактивное сопротивление $Z_1 = L_1\omega_1$,

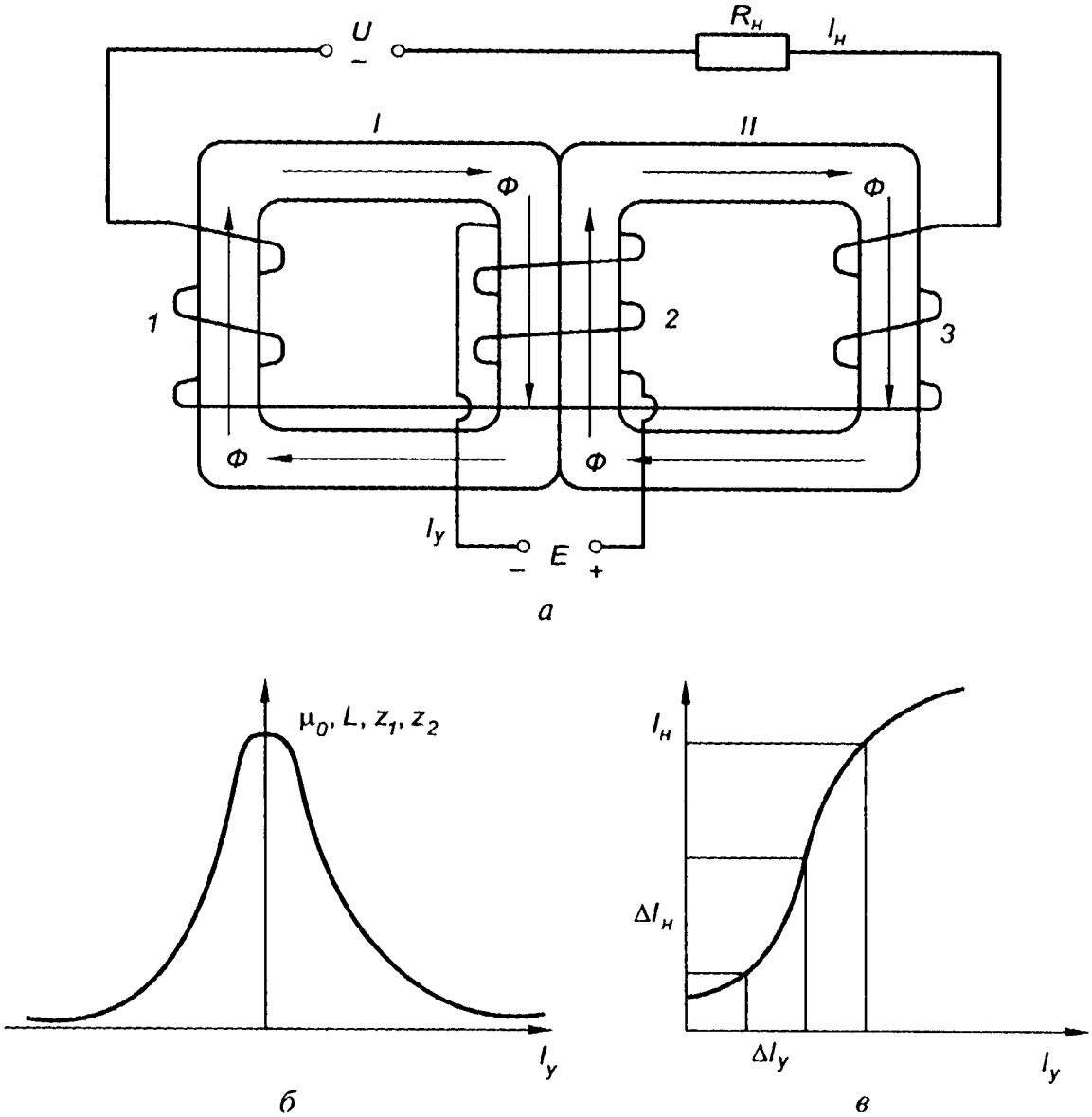


Рис. 3.33. Магнитный усилитель:
1 — 3 — обмотки

$Z_2 = L_2\omega_2$ дросселей *1*, *2* в цепи переменного тока определяются как геометрией обмоток *1*, *2*, так и магнитной проницаемостью сердечников μ_0, которая зависит от тока подмагничивания I_y в обмотке *3*. Чем больше I_y (рис. 3.33, *б*), тем меньше μ_0 сердечников, тем меньше индуктивности L_1 и L_2 и реактивные сопротивления Z_1, Z_2 дросселей и тем больше ток нагрузки $I_н$.

На рис. 3.33, *в* показана характеристика рассмотренного магнитного усилителя. Затрачивая небольшую мощность на ток подмагничивания I_y, можно управлять значительной мощностью и током нагрузки $I_н$.

Так как коэффициент усиления магнитного усилителя по току $k_i = I_н / I_y$ определяется реактивным сопротивлением дросселей, которое зависит от частоты переменного напряжения U, увеличе-

ние частоты с 50 до 500 Гц приводит к увеличению коэффициента усиления в 2—4 раза. Мощность магнитных усилителей достигает сотен киловатт при коэффициенте усиления 50...200 и КПД 0,6...0,98. Магнитные усилители нашли широкое применение в устройствах автоматики благодаря своей простоте и надежности. Главным недостатком усилителей этого типа является их инерционность, связанная с большой индуктивностью управляющей обмотки.

3.3.3. Электромашинные усилители

Электромашинные усилители (ЭМУ) применяют для управления мощными устройствами.

Простейший ЭМУ представляет собой генератор постоянного тока, вращаемый с постоянной скоростью (обычно — нерегулируемым 3-фазным асинхронным двигателем), который служит для усиления по мощности электрического сигнала, подаваемого на обмотку возбуждения.

Двухкаскадный ЭМУ получается, если два ЭМУ соединяются таким образом, чтобы выход первого ЭМУ подавался на обмотку возбуждения второго. Иногда двухкаскадное усиление с помощью ЭМУ получают путем установки на коллекторе генератора постоянного тока дополнительной пары короткозамкнутых щеток, расположенных перпендикулярно паре основных щеток. В этом случае создается дополнительная ЭДС, пропорциональная току через эту пару дополнительных щеток, что обеспечивает большее усиление исходного сигнала. Такой усилитель называют «ЭМУ с поперечным полем».

3.3.4. Гидро- и пневмоусилители

Усилители этой группы используют в качестве вспомогательного источника энергию жидкости под давлением или энергию сжатого воздуха.

Усилитель под управлением маломощного входного сигнала регулирует поток жидкости или газа, питающего привод, задавая тем самым мощность и величину перемещения рабочего органа.

Гидро- и пневмоусилители по принципу действия можно разбить на два класса: дроссельные и струйные.

К *дроссельным усилителям* относятся, например золотниковые усилители. Золотниковым усилителем называют прецизионное механическое устройство, состоящее из специальной гильзы с дросселирующими окнами и плунжера, которое предназначено для перераспределения давления и расхода рабочей среды (масла, воздуха), поступающей по напорному трубопроводу. Золотники бы-

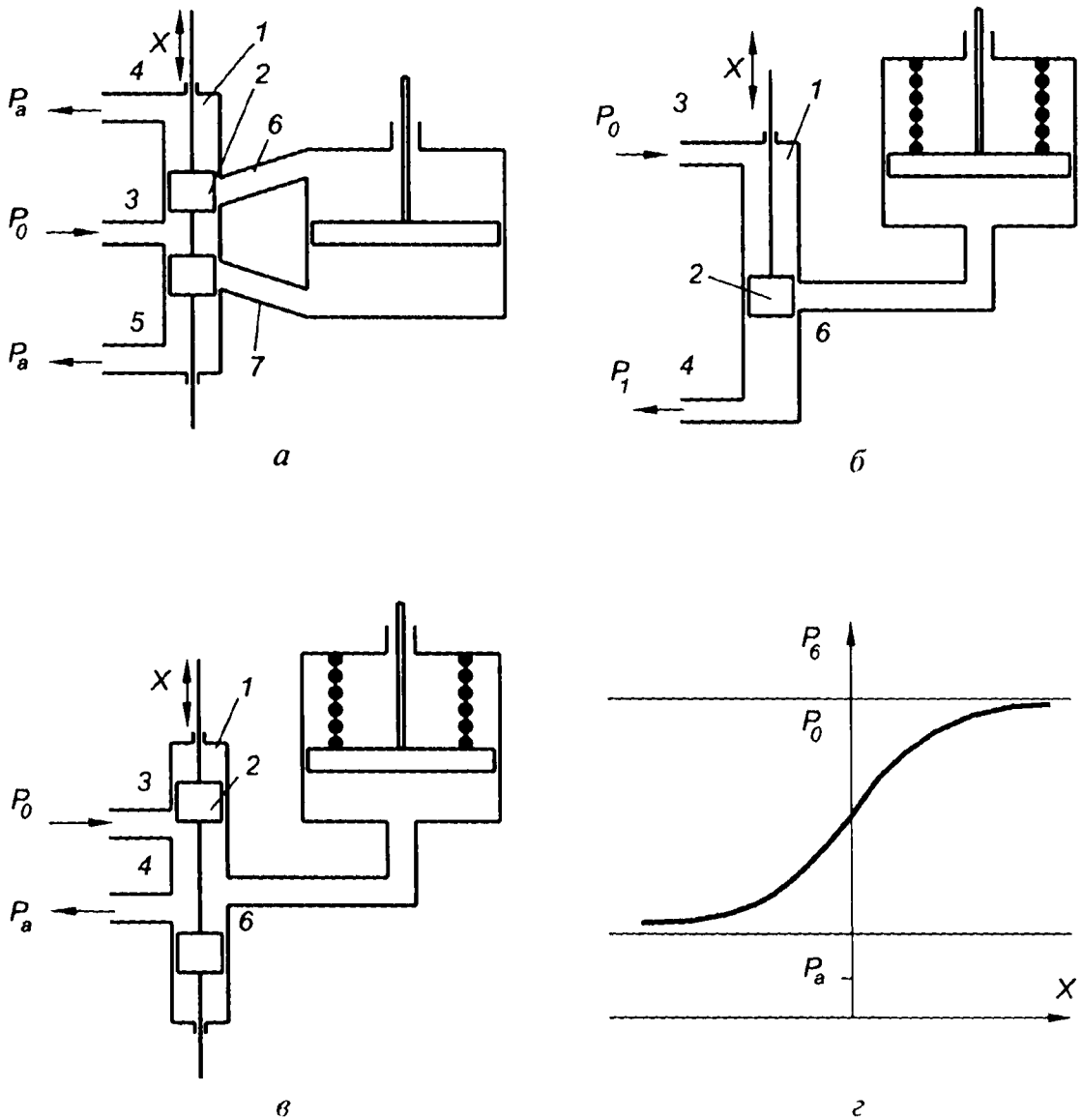


Рис. 3.34. Золотниковые усилители

вают плоские и цилиндрические. Рассмотрим схемы усилителей, построенных на базе цилиндрических золотников как наиболее распространенных.

На рис. 3.34, *а* приведена схема отсечного золотника для управления двусторонним приводом (подача рабочего тела должна осуществляться то в одну, то в другую полость рабочего цилиндра). Золотник состоит из цилиндра *1* и плунжера *2*, перемещающегося в цилиндре под действием управляющего воздействия *X*, перекрывающего окна *6* и *7* и управляющего подачей жидкости или газа в полости рабочего цилиндра. По трубе *3* подводится рабочая среда под давлением. Плунжер представляет собой двойной поршень и выполнен таким образом, что в среднем нейтральном положении он закрывает одновременно оба окна *6* и *7*, отсекая поступление рабочей среды в рабочий цилиндр или из него.

При смещении плунжера вверх под действием входного воздействия *X* окно *6* соединяется через золотник с напорной трубой *3*, окно *7* — со сливной трубой *5*, что вызовет перемещение рабочего поршня вниз. Скорость рабочего поршня определяется проходным сечением частично перекрытых окон *6*, *7* и положением поршней *2* плунжера. При перемещении плунжера вниз проходное сечение окон и подача жидкости или газа в окно *6* и из окна *7* будет постепенно уменьшаться до нуля (останов рабочего поршня при нейтральном положении плунжера), после чего уже окно *7* соединится с напорной трубой *3*, а окно *6* — со сливной трубой *4*, что вызовет перемещение рабочего поршня в обратном направлении.

Золотниковые усилители этого типа позволяют получить на выходе мощность до 100 кВт при воздействии на плунжер сигналом мощностью несколько ватт (коэффициент усиления по мощности может достигать 10^5). Усилие перемещения плунжера составляет обычно 0,5...20 Н, ход плунжера — 2...10 мм и более.

На рис. 3.34, *б* приведена схема отсечного золотника для управления односторонним приводом, когда рабочий поршень перемещается под действием рабочей среды только в прямом направлении (обратное перемещение осуществляется за счет пружины). Плунжер имеет один поршень *2*, перекрывающий окно *6* золотника, соединенное с одной из полостей рабочего цилиндра. В среднем нейтральном положении плунжер закрывает окно *6*, блокируя подачу или спуск рабочей среды из рабочего цилиндра и обеспечивая его неподвижность. При смещении под действием входного воздействия плунжера вниз нижняя полость рабочего цилиндра соединяется через золотник с напорной трубой *3*, что вызовет перемещение рабочего поршня вверх благодаря разности давлений в полостях цилиндра. При перемещении плунжера вверх вначале будет постепенно остановлено движение рабочего поршня вверх (при нейтральном положении плунжера), после чего полость рабочего цилиндра соединится со сливной трубой. Под действием пружины рабочий поршень пойдет вниз, выталкивая рабочую среду из нижней полости.

Схема и характеристика одностороннего привода с проточным золотником представлены на рис. 3.34 *в*, *г*. Плунжер золотника выполнен таким образом, что его цилиндры *2* меняют проходные сечения окон напорной *3* и сливной *4* труб, не перекрывая их целиком (за исключением крайних положений), так что через золотник имеется постоянный поток рабочей среды. В зависимости от положения плунжера меняется давление в камере золотника между цилиндрами и в нижней полости рабочего цилиндра. Поршень рабочего цилиндра всегда находится в равновесии под действием силы сжатия пружины сверху и давления рабочей среды снизу. Этот усилитель обладает высокой чувствительностью,

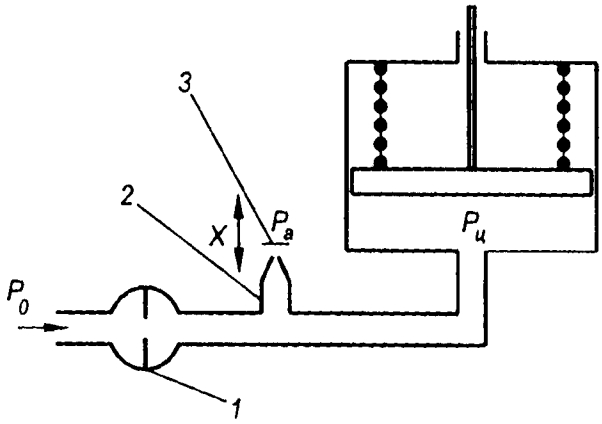


Рис. 3.35. Усилитель типа сопло-заслонка: *1* — дроссель; *2* — сопло дросселя; *3* — заслонка

отсутствием зоны нечувствительности, однако меньшей выходной мощностью.

Характерной особенностью золотниковых усилителей является наличие зазора между поршнями плунжера и гильзой, что обусловливает постоянную утечку рабочей среды. Разница между шириной поршня плунжера и размером окна гильзы золотника называется величиной перекрытия. По типу перекрытия различают золотники:

с положительным перекрытием, когда ширина поршня больше ширины окна гильзы;

нулевым перекрытием, когда ширина поршня равна ширине окна гильзы;

отрицательным перекрытием, когда цилиндр плунжера шире окна гильзы.

В целях получения более плотной отсечки цилиндры плунжера отсечного золотника выполняют шире окон (положительное перекрытие составляет 0,05...0,5 мм). При этом на характеристике возникает зона нечувствительности, что вызывает запаздывание срабатывания усилителя.

В проточном золотнике, наоборот, всегда имеется поток рабочей среды через золотник за счет отрицательного перекрытия.

На рис. 3.35 приведены схема усилителя типа сопло-заслонка, состоящего из дросселя *1* с постоянным гидравлическим сопротивлением и из дросселя с переменным гидравлическим сопротивлением, меняющимся при смещении заслонки *3* относительно сопла дросселя *2*. Рабочая среда подается на дроссель *1* с постоянным давлением P_0 и через дроссель *2* уходит на слив. Чем больше зазор между соплом *2* и заслонкой *3*, тем больше расход рабочей среды через дроссели, тем больше падение давления на дросселе *1* и тем ближе давление в рабочей полости $P_ц$ к атмосферному.

В зависимости от положения заслонки *3* в полости между дросселями устанавливается давление, задающее положение рабочего поршня, находящегося в равновесии под действием силы упругости пружины и силы давления рабочей среды на поршень. Коэффициент усиления мощности таких усилителей может достигать $k_P = 10^6$.

Струйные гидро- и пневмоусилители в качестве усилительного элемента используют струйную трубку (рис. 3.36), состоящую из поворотной трубки *1* и приемника *5* с соплами *3*, *4*. В трубку *1* подается рабочая среда под давлением. Управляющее воздействие *X* пово-

рачивает трубку *1*, меняя направление струи рабочей среды, расход через сопла *3*, *4* и давление в них. Противовес *2* предназначен для удержания трубки в равновесном состоянии. При повороте трубки влево давление в канале *3* будет расти, в канале *4* — падать.

Струйные трубки работают под давлением масла порядка 4...8 бар при расходе через трубку 5...10 л/мин. Максимальное отклонение трубки составляет обычно 1...2 мм.

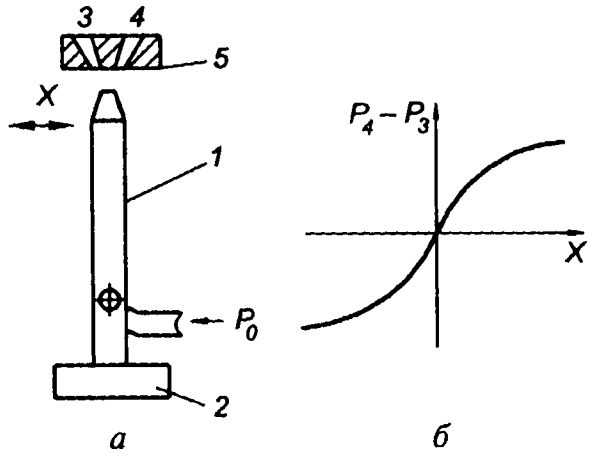


Рис. 3.36. Струйный усилитель:
а — конструктивная схема струйного усилителя; *б* — его статическая характеристика

Гидро- и пневмоусилители выполняют как однокаскадные ($k_P = 10^3 ... 10^4$), так и двухкаскадные ($k_P = 10^4 ... 10^5$).

Пневмоусилители имеют коэффициент усиления на порядок выше и инерционность на 1—2 порядка меньше, чем гидроусилители. Часто первый каскад усилителя выполняют пневматическим, второй — гидравлическим.

3.4. Корректирующие устройства

Корректирующим устройством называется сложная комбинация пропорциональных, интегральных, дифференциальных и других звеньев, корректирующая управляющий сигнал для обеспечения требуемых динамических характеристик системы. К этой группе устройств относятся последовательное корректирующее звено-регулятор и вспомогательные обратные связи в системах автоматического регулирования.

В зависимости от природы сигнала применяются электрические, механические, гидравлические, пневматические, комбинированные и цифровые корректирующие устройства. В электрических цепях систем управления в качестве корректирующих устройств используются схемы на резисторах, емкостях и индуктивностях, в механических узлах — пружины, гироскопы, рычаги обратных связей, в гидро- и пневмосистемах — дроссели, демпферы, каналы обратных связей.

Важными требованиями, предъявляемыми к корректирующим устройствам, являются возможность сложной коррекции амплитуд гармонических составляющих сигнала в зависимости от частоты и возможность адаптации структуры корректирующего устройства в процессе функционирования. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют цифровые корректирующие ус-

тройства, реализуемые в виде программ микропроцессорных регуляторов.

Фильтрами называют частотно-избирательные устройства, пропускающие или задерживающие составляющие сигнала в зависимости от их частот. Различают аналоговые активные фильтры, выполненные в виде электронных схем на сопротивлениях и конденсаторах (RC-фильтры) и включаемые последовательно в цепь преобразования, и цифровые фильтры, являющиеся программами в цифровых регуляторах, по которым обрабатываются поступившие в регулятор последовательности замеров от датчиков. Существенным достоинством аналоговых фильтров является их простота и низкая стоимость, недостатком — ограниченные возможности и малая гибкость.

Преимуществом цифровых фильтров является возможность применения разнообразных и сложных алгоритмов фильтрации и гибкость, обеспечиваемая возможностью простого переключения регулятора с использования одной программы фильтрации на другую. Для цифровых фильтров характерна некоторая задержка сигнала по времени, необходимая для выполнения расчетов.

Рост быстродействия современных микропроцессоров снизил задержку даже при сложной цифровой фильтрации до нескольких миллисекунд, что в большинстве случаев применения практически оказывается незаметным.

Различают фильтры:

- низкочастотные (ФНЧ), пропускающие гармоники низкой частоты и подавляющие высокочастотные гармоники;
- высокочастотные (ФВЧ), пропускающие только высокочастотные гармоники;
- полосовые (ПФ), пропускающие гармоники только в заданном частотном диапазоне;
- режекторные (РФ), подавляющие гармоники в заданном частотном диапазоне (например, сетевую наводку на частоте 50 Гц).

Реальные системы управления часто функционируют в условиях мощных электромагнитных излучений, порождаемых электросетью и силовым электромагнитным оборудованием (трансформаторами, электродвигателями, переключателями и т.д). Мощность электромагнитной помехи, наводимой на соединительные цепи, может быть соизмерима с мощностью электрического сигнала от датчика типа термопары, что отрицательно влияет на качество регулирования. Для борьбы с электромагнитными помехами применяют различные методы. За счет фильтрации помеха, например, от сети питания 50 Гц может быть ослаблена в десятки раз.

Простая скрутка пары соединительных проводов снижает наводки в 10 раз, причем, чем меньше шаг скрутки, тем меньше уровень помех. Одним из основных методов является защитное

экранирование: низковольтные цепи заключают в металлический кожух и применяют экранированный провод, состоящий из одной или нескольких изолированных медных жил, заключенных в экран, сплетенный из тонких медных проводов. Наиболее эффективны непрерывные экраны.

Иногда целесообразно экранирование источника помехи, например электродвигателя, заключением его в сплошной металлический заземленный экран. Экранирование позволяет снизить уровень помех в десятки раз.

Одним из источников помех является неудачная схема заземления источника и приемника сигнала. Уровень помех в зависимости от схемы заземления может изменяться в несколько раз.

Следует отметить, что борьба с помехами является во многом искусством и применение рекомендуемых методов часто недостаточно для снижения помехи до требуемого уровня.

3.5. Переключающие устройства и распределители

Переключающие устройства и *распределители* предназначены для включения, отключения, переключения электрических цепей в электроприводе и потоков жидкости или газа в гидро- и пневмоприводе.

3.5.1. Электромагнитные реле

Некоторые характеристики электромагнитных и электронных реле приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Реле	Мощность срабатывания $P_{ср}$, Вт	Мощность управления $P_у$, Вт	Время срабатывания $t_{ср}$, с	Коэффициент усиления по мощности k_P
Электромагнитные:				
нейтральные	$10^{-3}...10^{-2}$	$10^{-1}...10^{-4}$	$10^{3}...2\cdot10^{-1}$	$10^{2}...10^{6}$
поляризованные	$5\cdot10^{3}...5\cdot10^{-1}$	10...20	$10^{-3}...15\cdot10^{-3}$	40...2000
Электронные	$10^{-12}...10^{-8}$	$10^{-3}...10^{2}$	$10^{-9}...10^{-8}$	$10^{8}...10^{10}$

Электромагнитное реле — типовой элемент автоматики, управляющий подачей значительной мощности источника питания в нагрузку, переключая контакты реле за счет использования небольшой мощности в цепи управления. Реле в общем случае представляют собой промежуточный элемент, приводящий в действие одну или несколько электрических цепей.

По сравнению с бесконтактными полупроводниковыми переключателями (транзисторами и тиристорами) контактные реле обладают следующими преимуществами:

устойчивостью к изменению температуры;

широким диапазоном коммутируемых токов и напряжений;

устойчивостью к электрическим перегрузкам как на контактах, так и в цепи управления;

радиационной стойкостью;

возможностью коммутации большого числа гальванически развязанных цепей;

небольшими массой, габаритыми размерами, стоимостью.

Существуют реле постоянного и переменного тока. В основном применяются реле постоянного тока, подразделяемые на нейтральные и поляризованные.

Схема нейтрального реле и его характеристика приведены на рис. 3.37, *а*, *б*. При росте управляющего тока в катушке *1* растет сила притяжения якоря *6* к сердечнику *2*, которой противодействует упругая сила изгиба контакта *4*. При достижении управляющим током значения тока срабатывания $X_{ср}$ происходит вначале размыкание нормально замкнутых (размыкающих) контактов *4*, *5*, что приведет к размыканию цепи с лампой *HL*1, потом замыкание нормально разомкнутых (замыкающих) контактов *4*, *3* и замыкание цепи с лампой *HL*2. Дальнейшее увеличение тока в уп-

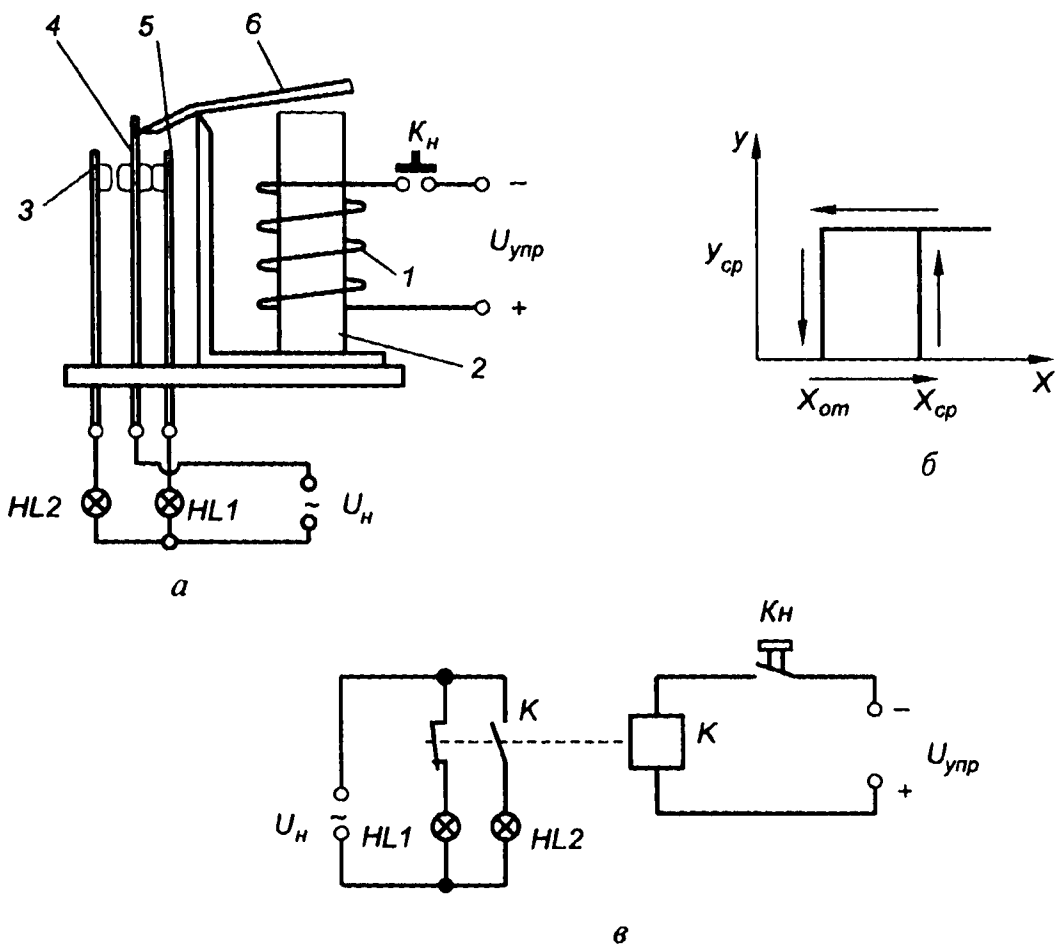


Рис. 3.37. Схема сигнализации на нейтральном электромагнитном реле

равляющей цепи никак не влияет на выходной сигнал. При уменьшении управляющего тока сила, притягивающая якорь к сердечнику, убывает, и при токе отпускания сила упругости разомкнет контакты *4*, *3* и замкнет контакты *4*, *5* выходных цепей.

Изменение знака управляющего сигнала в нейтральных реле не меняет знака выходного сигнала. Так как для намагничивания сердечника при росте управляющего тока затрачивается энергия магнитного поля, при уменьшении управляющего тока магнитная индукция и сила притяжения якоря сердечником падают с некоторым запаздыванием и ток срабатывания $X_{ср}$, как правило, больше тока отпускания $X_{отп}$, а характеристика имеет петлю гистерезиса.

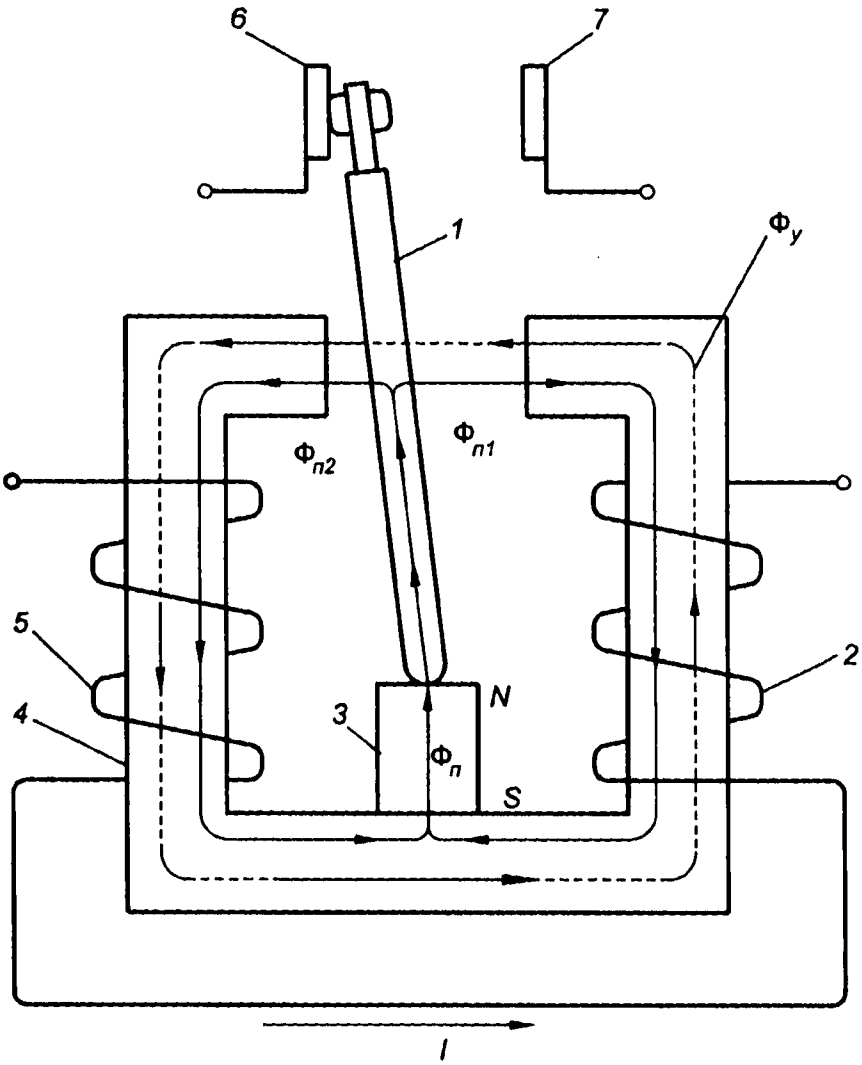
Нейтральное реле имеет два устойчивых состояния: контакты реле разомкнуты или контакты реле замкнуты, статическая характеристика реле двухпозиционная, имеет вид ступеньки. Мощность в управляющей цепи реле может быть значительно меньше мощности в цепи нагрузки, поэтому можно говорить об электромагнитном реле как об усилителе мощности.

На рис. 3.37, *в* приведена схема сигнализации на базе нейтрального реле. Катушка и контакты реле обозначены одинаково — буквой *К* — и соединены пунктиром. Если в качестве кнопки применить путевой выключатель, а вместо ламп — электропривод станка, получим схему концевого выключателя электропривода.

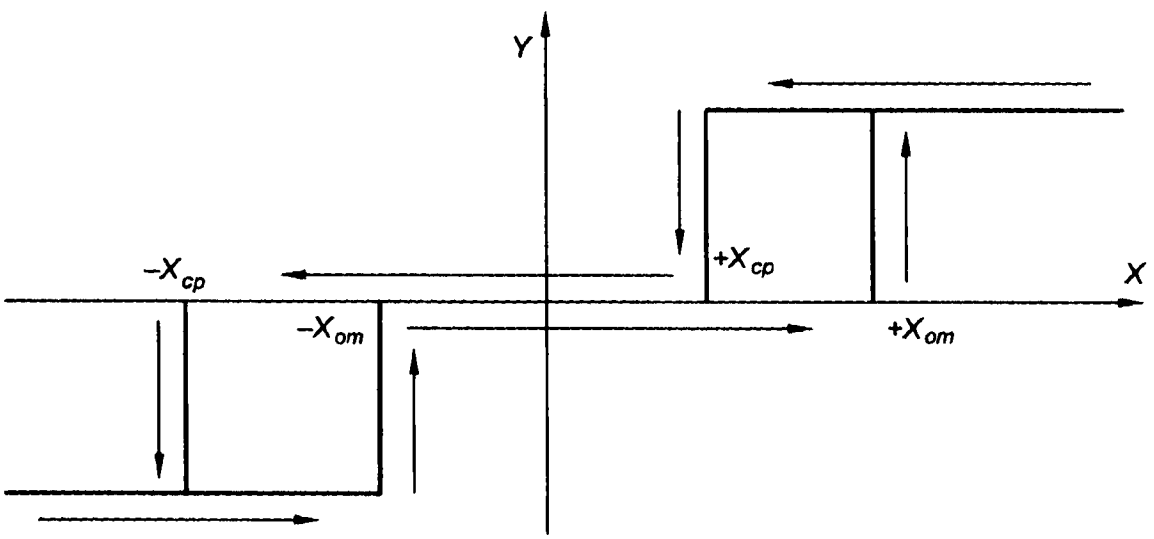
В поляризованных электромагнитных реле направление отклонения якоря от нейтрального положения зависит от направления тока в катушке, что вызывает замыкание (размыкание) одной из двух групп контактов.

На рис. 3.38, *а* приведена схема поляризованного реле, состоящего из управляющих обмоток *2* и *5*, включенных последовательно и согласно (их магнитные потоки дополняют друг друга), постоянного магнита *3*, сердечника *4*, якоря *1* и контактов *6*, *7*. Постоянный магнит создает в сердечнике постоянный поляризующий магнитный поток $\Phi_п$. Ток в управляющих обмотках *2* и *5* создает управляющий магнитный поток $\Phi_у$, направление и величина которого определяются направлением и величиной управляющего тока *I*. При $I = 0$ якорь *1* находится в равновесии, контакт *1* — между контактами *6* и *7*, выходные цепи разомкнуты. При росте управляющего тока *I* на поляризующий магнитный поток $\Phi_п$ наложится поток $\Phi_у$ от обмоток *2* и *5*, причем для указанного направления тока *I* потоки $\Phi_п$ и $\Phi_у$ в левом полусердечнике будут складываться, а в правом — вычитаться, так что якорь будет сильнее притягиваться к левому полусердечнику, чем к правому, повернется влево и замкнет контакты *1* и *6*. При изменении полярности управляющего сигнала якорь повернется вправо и замкнет контакты *1* и *7*.

Реле имеет три устойчивых состояния (рис. 3.38, *б*): нейтральное и два положения срабатывания, определяемых направлением уп-



а



б

Рис. 3.38. Поляризованное электромагнитное реле

равляющего тока. Характеристика имеет петлю гистерезиса и зону нечувствительности. Поляризованные реле имеют высокую чувствительность и быстродействие и широко применяются в автоматике.

Основными параметрами, характеризующими работу реле, являются:

мощность срабатывания $P_{\text{сраб}}$ — электрическая мощность на входе реле, при которой происходит замыкание (размыкание) контактов (0,001 ... 0,1 Вт);

время срабатывания — время между моментом подачи на реле управляющего импульса и моментом замыкания контактов управляемой цепи (0,001 ... 0,2 с);

мощность управления $P_{\text{упр}}$ — электрическая мощность управляемой цепи (10 ... 1000 Вт и более).

Коэффициент усиления по мощности для реле, иногда называемый коэффициентом управления, определяется как $k_P = P_{\text{упр}} / P_{\text{сраб}}$ и составляет $40 ... 10^6$.

Вместо контактных электромагнитных реле все чаще применяют полупроводниковые ключи, построенные на базе транзисторов и тиристоров. Простейший ключ на транзисторе (рис. 3.39, *а*) представляет собой усилитель с релейной характеристикой. При наличии напряжения на базе транзистор пропускает ток, его сопротивление в цепи эмиттер–коллектор мало. При отсутствии напряжения на базе транзистор закрыт, ток от эмиттера к коллектору и в выходной цепи отсутствует.

Тиристор — это полупроводниковый четырехслойный прибор, способный, подобно диоду, пропускать ток только в одну сторону, причем ток пойдет только при наличии на управляющем электроде открывающего напряжения. Когда входной сигнал достигает заданного уровня (рис. 3.39, *б*), сопротивление ключа мало́ (ключ открыт); если входной сигнал ниже заданного порогового — сопротивление ключа велико́ (ключ закрыт). После снятия управ-

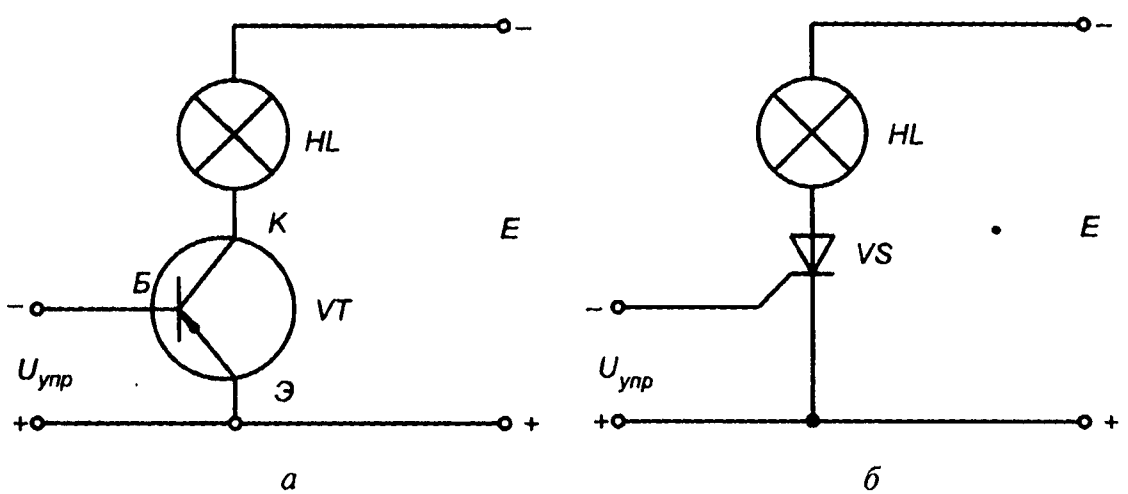


Рис. 3.39. Ключи на транзисторе (*а*) и тиристоре (*б*)

ляющего сигнала тиристор будет пропускать ток еще некоторое время, пока не закроется, поэтому тиристоры называют приборами с неполной управляемостью.

Тиристор имеет релейную характеристику при двух устойчивых состояниях — открытом и закрытом. Для ускорения запирания тиристора применяют специальные схемы.

Переключение полупроводниковых ключей занимает несколько микросекунд, т.е. происходит практически мгновенно. Полупроводниковые ключи имеют малые габаритные размеры, большую механическую прочность, устойчиво работают в диапазоне температур — 60...150 °С, способны пропускать токи до 300 А.

Подобие некоторых физических свойств жидкостей и газов объясняет подобие конструкций гидро- и пневмораспределителей. Так же как и усилители, они подразделяются по типу распределительного элемента на распределители давления и расхода золотникового типа, распределители с соплом и заслонкой, распределители струйного типа, распределители клапанного типа и комбинированные.

3.5.2. Электромеханические муфты

Управляемые муфты служат для передачи движения от одного вала к другому по сигналам управления и являются дистанционными управляемыми выключателями механического движения. С помощью муфт осуществляется быстрое подключение или отключение и торможение элементов управляемого объекта от постоянно работающего электродвигателя. Муфты позволяют плавно регулировать частоту вращения ведомого вала и передаваемый на него момент за счет регулируемого проскальзывания ведущего и ведомого элементов муфты, что важно для предотвращения аварии в момент резкого возрастания нагрузки на привод (например, в момент включения муфты).

По характеру связи между ведущим и ведомым элементами конструкции различают *муфты с механической связью*, или *фрикционные* (в которых степень проскальзывания полумуфт друг относительно друга регулируется силой сжатия контактирующих поверхностей), и муфты, передающие крутящий момент за счет взаимодействия электромагнитных полей полумуфт без их механического контакта. Это *гистерезисные*, *индукционные* (синхронные и асинхронные) и *конденсаторные электромагнитные муфты*.

Основными критериями работоспособности муфт являются прочность сцепления, или максимальный передаваемый момент, износостойкость поверхностей трения, теплостойкость.

Для дополнительного увеличения коэффициента трения и передаваемого момента в 3—4 раза соприкасающиеся поверхности полумуфт изготавливают из специальных материалов. В сухих фрик-

ционных муфтах применяют трение стали или чугуна по накладкам из фрикционного материала на асбестовой основе или по металлокерамическим накладкам. Фрикционные тела муфт, работающих в масле, выполняют из закаленной стали, трущейся по фрикционной пластмассе или металлокерамике.

В электромагнитных муфтах полумуфты образуют замкнутую магнитную систему. Муфта выполнена из ферромагнитных материалов и имеет одну или несколько обмоток возбуждения. Постоянный ток подается на вращающуюся катушку по контактным кольцам и щеткам.

В маломощных фрикционных муфтах сами подвижные полумуфты не имеют обмоток (рис. 3.40, *а*), одна из них (обычно ведомая) перемещается под действием магнитного поля неподвижной обмотки возбуждения, сцепляясь со второй полумуфтой. При подаче тока в обмотку *3* возникает магнитное поле, перемещающее вдоль ведомого вала по шлицам или шпонке и прижимающее ведомый элемент муфты *2* к ведущему *1*. Для передачи больших моментов применяют многодисковые муфты с подвижной катушкой электромагнита (рис. 3.40, *б*), в которых площадь соприкосновения ведущей и ведомой полумуфт в несколько раз больше. При отключении тока пружина отжимает ведомую полумуфту от ведущей и прижимает ее к тормозной поверхности, чем обеспечивается быстрое торможение. Работа такой муфты подобна работе электромагнита.

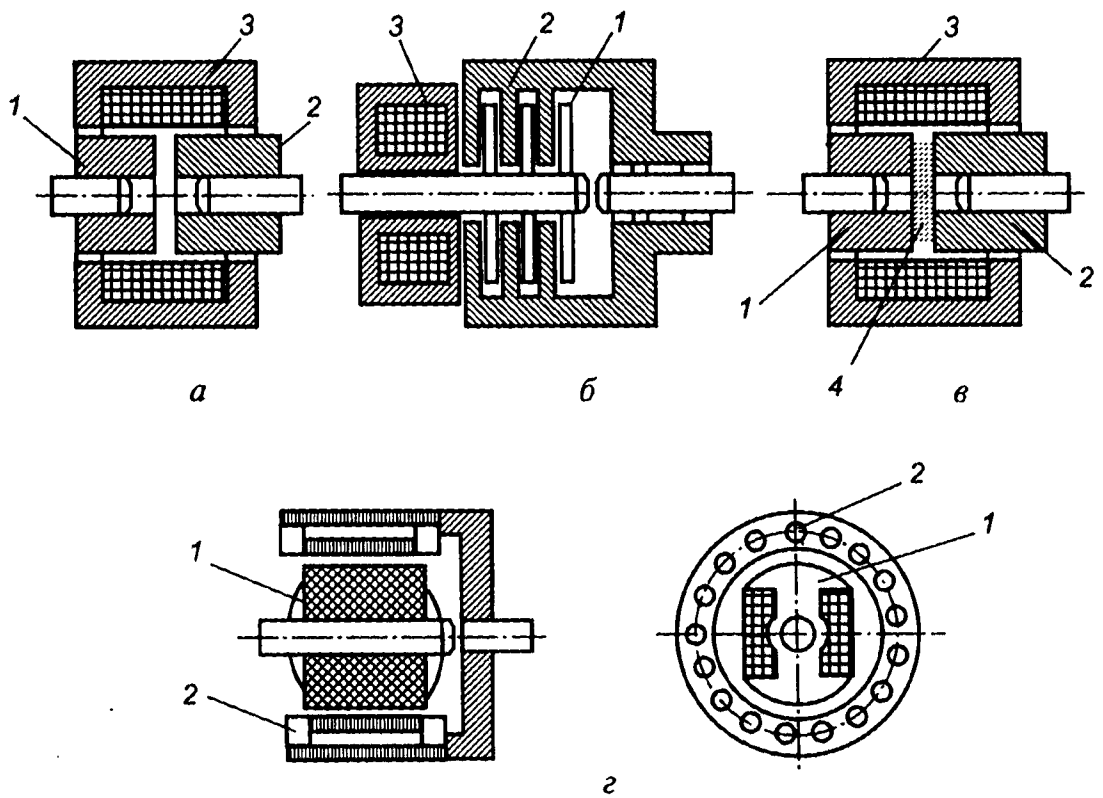


Рис. 3.40. Электромагнитные муфты

Наряду с дисковыми применяют конусные и цилиндрические обжимные муфты, позволяющие передавать большие моменты, однако они имеют значительные габариты и конструктивно сложнее, что обусловило ограниченность их применения.

Зазор между полумуфтами может быть заполнен ферромагнитным порошком *4* (рис. 3.40, *в*). Под действием магнитного поля при включении муфты зерна порошка располагаются вдоль силовых линий и образуют мостики, связывающие полумуфты. Сопротивление сдвигу намагниченного порошка тем больше, чем сильнее он намагничен, что позволяет легко управлять передаваемым моментом. Порошок состоит из зерен диаметром от 4 до 50 мкм и может быть сухим (графит, тальк) или жидким, пропитанным силиконовыми, трансформаторными маслами, фтористыми соединениями.

Электромагнитные фрикционные муфты с ферромагнитным наполнителем более надежны и менее инерционны (время срабатывания составляет менее 20 мс), имеют больший КПД. К недостаткам следует отнести сложность конструкции, постоянные потери ферромагнитного порошка через уплотнения, необходимость периодической смены порошка (в среднем через 400... 500 ч работы) ввиду постепенного окисления и разрушения зерен порошка.

В асинхронных индукционных муфтах передаваемый момент управляется изменением напряжения на обмотке возбуждения индуктора. Такие муфты способны передавать мощность от нескольких ватт до тысяч киловатт. Одна из полумуфт (рис. 3.40, *г*) имеет электромагнитные полюсы *1* с обмоткой возбуждения (индуктором), конструктивно выполненной подобно ротору асинхронного двигателя и питаемой постоянным током. Другая полумуфта имеет короткозамкнутую обмотку *2*, аналогичную роторной обмотке асинхронного двигателя. При вращении индуктора в обмотке якоря возникает ЭДС и идет ток. Взаимодействие этого тока с магнитным потоком возбуждения создает электромагнитный момент, приводящий во вращение якорь. При этом в муфте происходят те же процессы, что и в асинхронном электродвигателе. Разница заключается в том, что вращение магнитного поля в двигателе происходит за счет подачи переменного трехфазного напряжения в обмотку неподвижного статора, а в муфте вращение поля обеспечивается вращением индуктора, питаемого постоянным током. Как и в асинхронном двигателе, момент передается только при разных скоростях вращения индуктора и якоря. Ведомая часть муфты вращается с частотой

$$n_2 = n_1(1 - s),$$

где n_1 — частота вращения ведущей полумуфты; $s = 0,03...0,05$ — скольжение.

Частота вращения ведомой полумуфты всегда ниже частоты вращения ведущей полумуфты, поэтому такие муфты называют

также электромагнитными муфтами скольжения. Следует заметить, что с ростом скольжения падает КПД муфты.

Если момент нагрузки привода превышает максимальный момент муфты, то происходит опрокидывание — прекращение вращения ведомой полумуфты, что предотвращает перегрузку приводного двигателя. Максимальный момент муфты определяется магнитным полем возбуждения и током возбуждения. Меняя ток возбуждения, можно управлять критическим моментом муфты.

Муфты широко применяются в регулируемых электроприводах переменного тока, состоящих из нерегулируемого электродвигателя и муфты с системой управления током возбуждения. Эти приводы просты в устройстве и эксплуатации, дешевы и надежны, однако обладают невысокими КПД и мощностью. Электромагнитные муфты в целом обладают высокой надежностью, долговечностью и быстродействием и используются для передачи мощности до тысяч кВт.

Электромеханические муфты широко используются в электромеханических приборах, лентопротяжных механизмах, станках с ЧПУ, автоматических манипуляторах и т.д.

3.5.3. Логические элементы

Современное оборудование часто требует построения систем управления со сложной логикой, определяющих момент включения, длительность работы, время ускорения и торможения, причем эти действия должны быть согласованы между собой по времени. Основой таких схем управления являются *логические элементы*, построенные на базе переключателей и осуществляющие логическую связь между входными и выходными сигналами.

Сигналы в этих цепях дискретны, принимают одно из двух возможных значений: 0 (нет напряжения) или 1 (есть напряжение). Теоретической основой построения таких схем является булева алгебра, или алгебра логики.

Логической переменной называют величину, принимающую одно из двух значений: 0 или 1. Под *логической функцией* понимают зависимость выходной логической величины от входных логических величин. Логическая операция — это действие, совершаемое логическим элементом над входными логическими величинами в соответствии с логической функцией. Соответствие значения логической функции значениям логической переменной отражено в так называемых таблицах истинности.

Говорят, что значения 1 и 0 противоположны, или инверсны, что обозначается $\overline{1} = 0$ и $\overline{0} = 1$.

Основными операциями алгебры логики являются:

1) логическое отрицание, инверсия, НЕ, например $Y = \overline{X}$. Таблица истинности этой операции имеет вид

X	Y
0	1
1	0

2) логическое сложение, ИЛИ: выходная величина Y принимает значение 1, если хотя бы одна из входных величин X_i равна 1, например, $Y = X_1 + X_2$. Таблица истинности в этом случае выглядит так:

X_1	X_2	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

3) логическое умножение, И, когда выходная величина Y принимает значение 1, если все входные величины X_i равны 1, например $Y = X_1 \cdot X_2$. Таблица истинности логического умножения выглядит следующим образом:

X_1	X_2	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Логические схемы строят на базе электромагнитных реле и других переключателей, однако в последнее время в основном используют полупроводниковые транзисторные переключатели (в виде цифровых микросхем). Используя простейшие элементы, можно построить логическую машину, способную выполнять сложные логические функции. Например, современная ЭВМ, построенная на приведенных элементах, способна выполнять сложные расчеты, управлять оборудованием, хранить и обрабатывать огромные объемы информации.

На рис. 3.41 приведены примеры реализации логических элементов на базе реле и полупроводников и их условные обозначения. В качестве источников входных сигналов используются кнопки $Кн_1$ и $Кн_2$, при нажатии которых в цепях обмоток реле X_1 и X_2 пойдет ток, и их замыкающие контакты замкнутся. Значение 1 выходной логической величины соответствует зажженной лампе HL.

Инверсия обозначается незакрашенным кружком, операция ИЛИ обозначается 1, операция И — знаком &. Элемент НЕ на реле представлен как один замыкающий контакт реле X и один размыкающий контакт реле Y: при наличии входного напряжения на реле X_1 (значение 1) контакт X_1 замкнется, что вызовет срабатывание реле Y и размыкание контакта Y (значение 0).

При отсутствии входного напряжения (0) контакт X_1 будет разомкнут, реле Y обесточено и контакт Y замкнут (1). В схеме эле-

мента НЕ на транзисторе при наличии входного напряжения $U_{вх}$ (1) транзистор открыт, выходное напряжение будет низким (0). При отсутствии входного напряжения транзистор заперт, напряжение на выходе будет высоким, практически равным напряжению питания E(1).

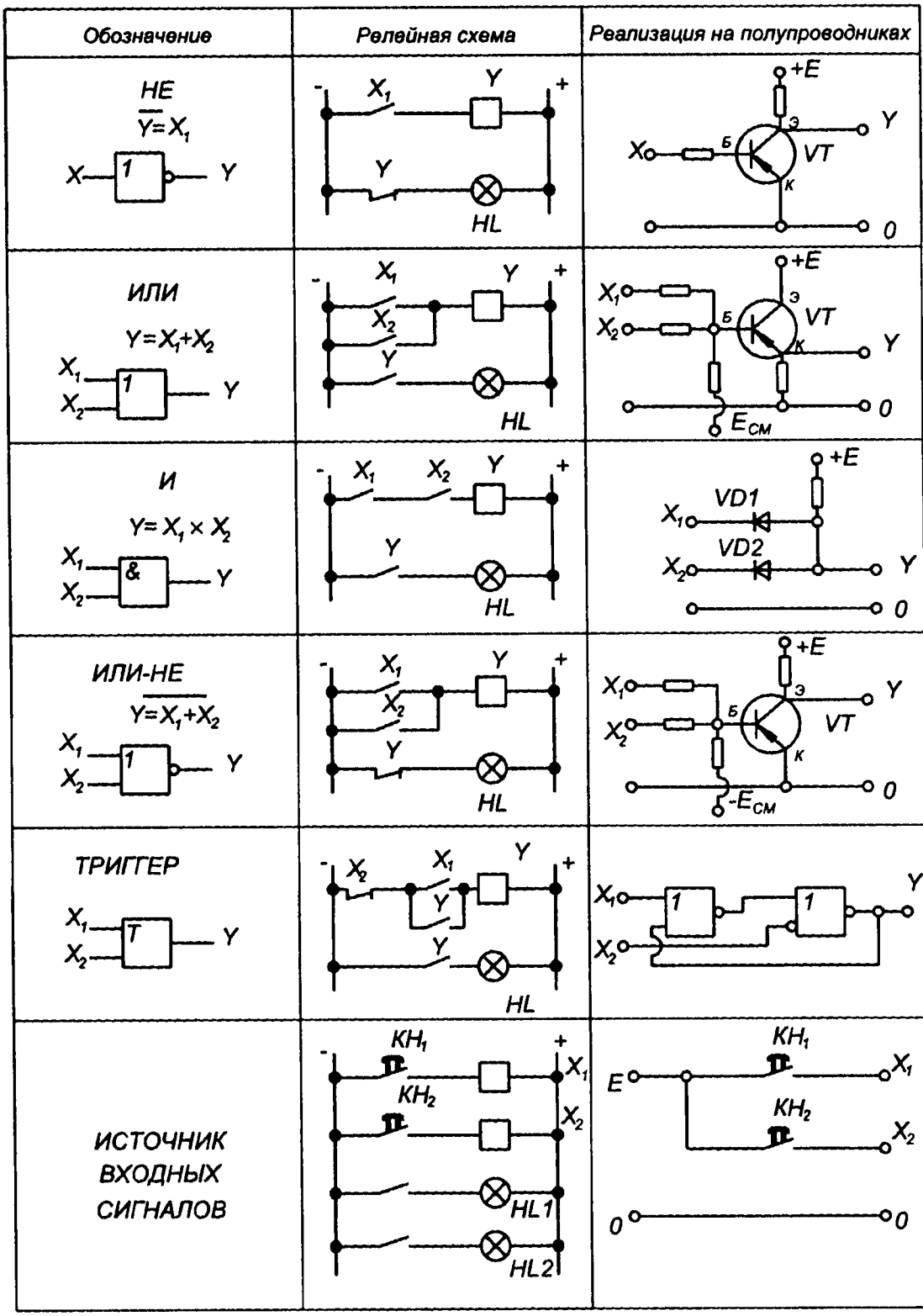


Рис. 3.41. Логические элементы и их реализация

Элемент ИЛИ на реле можно представить двумя замыкающими контактами, соединенными параллельно. При замыкании первого X_1 или второго X_2, или обоих контактов сработает реле Y и замкнется контакт Y.

В схеме элемента ИЛИ на транзисторе при приходе напряжения на базу с любого из входов транзистор откроется, и выходное напряжение станет близким к $E(1)$, иначе транзистор закрыт, выходное напряжение низкое (0).

Элемент И на реле представлен в виде двух замыкающих контактов X_1 и X_2, соединенных последовательно: только при замыкании обоих входных контактов в реле Y пойдет ток и замкнется выходной контакт Y.

Элемент И на диодах работает следующим образом. Если на всех входах имеется высокое напряжение (1), то тока через диоды и падения напряжения на резисторе R не будет, выходное напряжение будет высоким (близким к E). Если хотя бы на одном входе имеется низкое напряжение (0), через соответствующий диод пойдет ток и выходное напряжение будет низким.

Аналогично можно построить элемент И на двух транзисторных ключах. При построении логических схем оказался удобным элемент ИЛИ-НЕ, имеющий логическую функцию $Y = \overline{X_1 + X_2}$, или инверсия логического сложения входных сигналов.

На рис. 3.41 приведены реализации элемента ИЛИ-НЕ на реле и транзисторе. Схемы подобны реализациям элемента ИЛИ. Инверсия в первом случае осуществляется использованием размыкающего контакта реле Y. Во втором случае инверсия осуществляется за счет снятия выходного напряжения с транзистора.

При наличии хотя бы на одном входе высокого напряжения (ИЛИ) транзистор отпирается и напряжение на выходе становится низким (НЕ).

На рис. 3.41 приведены реализации триггера — элемента памяти, сохраняющего установленное на нем логическое значение. В схеме на реле при кратковременном замыкании контакта X_1 пойдет импульс тока через реле Y, что вызовет замыкание контакта Y, делающего ток через реле Y постоянным, т. е. схема хранит значение 1. При размыкании контакта X_2 ток через катушку реле Y прекращается и контакты Y размыкаются, т. е. элемент хранит значение 0. При замыкании контакта X_2 ток через реле Y не возобновится, так как контакт реле Y разомкнут. Таким образом, у триггера есть два входа. Подача единичного сигнала на один из них устанавливает триггер в 1, на другой — в 0.

Представлена схема триггера на двух элементах ИЛИ-НЕ. По приходе на вход X_1 первого элемента ИЛИ-НЕ единичного импульса на его выходе возникнет сигнал 0, который в свою очередь вызовет сигнал 1 на выходе второго элемента ИЛИ-НЕ. Этот сигнал поступит на второй вход первого элемента ИЛИ-НЕ и установит

постоянным выходной сигнал первого элемента ИЛИ-НЕ в 0, а второго — в 1. Приход на вход X_2 второго элемента ИЛИ-НЕ единичного импульса обнулит его выход. При отсутствии на втором входе X_1 единичного сигнала на выходе первого элемента ИЛИ-НЕ возникнет единичный импульс, который установит в 0 выходной сигнал второго элемента ИЛИ-НЕ.

Промышленностью выпускаются разнообразные микросхемы, содержащие в единице объема большое количество транзисторов, диодов, резисторов, емкостей и других электронных приборов, имеющие небольшие размеры и воспроизводящие разнообразные логические функции. Микросхемы дешевле схем на реле или транзисторах, имеют меньшие габариты и бóльшую надежность.

3.6. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи

Преобразователи электрических сигналов — вспомогательные устройства систем управления, предназначенные для согласования элементов системы управления без изменения количества информации, содержащегося в преобразуемом сигнале. Преобразователь переводит сигнал постоянного тока в переменный (модулятор) и обратно (демодулятор), масштабирует сигнал (усилитель).

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) осуществляет преобразование аналоговых, способных непрерывно меняться по уровню электрических сигналов вида $U(t)$ в цифровую форму — последовательность двоичных кодов X_i, выдаваемых на выход через заданные промежутки времени. Например, выходное напряжение тензометрического неравновесного моста предварительно усиливается, фильтруется и преобразуется в АЦП в форму, удобную для ввода в управляющую ЭВМ.

По сигналам от таймера, приходящим на микросхему АЦП через заданные промежутки времени Δt, АЦП считывает входное аналоговое напряжение и кодирует его совокупностью двоичных разрядов или битов — двоичным кодом, т.е. происходит дискретизация сигнала по времени (рис. 3.42, *а*, *б*).

Наиболее распространены 12-разрядные АЦП, преобразующие напряжение в диапазоне от −5,12 до +5,12 В в 12-битовое двоичное число. Двенадцать битов позволяют кодировать натуральные числа в интервале от 0 до 4095 (если все биты равны 0, то число равно 0, если все биты равны 1, то число равно 4095) или целые числа со знаком от −2048 до +2047. Диапазон напряжений ±5,12 В разбивается на 4096 интервалов, каждому из которых ставится в соответствие целое число. Входное напряжение округляется до ближайшего из 4096 уровней — середин интервалов, и в качестве выходного сигнала выдается целый код этого уровня (рис. 3.42, *в*).

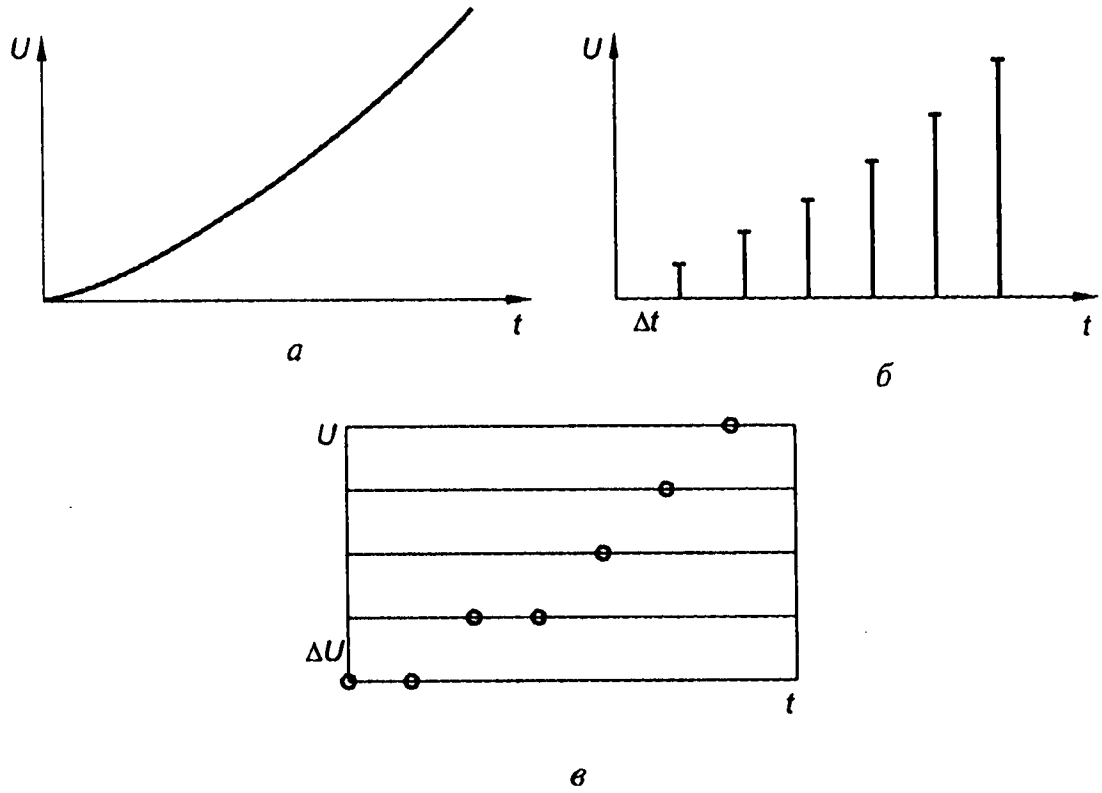


Рис. 3.42. Дискретизация сигнала в АЦП

Чувствительность АЦП (минимальное приращение входного сигнала, вызывающее изменение выходного сигнала) будет равна величине интервала разбиения и составит 10,24 В/4096 = 2,5 мВ.

Возможна работа АЦП по принципу округления входного напряжения до ближайшего снизу уровня, когда чувствительность остается той же, но добавляется систематическая погрешность сдвига нуля вниз на половину интервала, т.е. на 1,25 мВ.

Время преобразования или *быстродействие* АЦП — это интервал времени от начала преобразования входного напряжения до появления на выходе АЦП (выходном регистре, состоящем из 12 триггеров и доступном для чтения другим микросхемам) соответствующего кода. Обратная величина составляет *максимальную теоретическую частоту преобразования* данного АЦП.

Обычные, широко распространенные АЦП имеют время преобразования около 2 мкс (от 1 до 10 мкс) и частоту преобразования около 500 кГц, но выпускаются и АЦП с частотой преобразования до 500 МГц. Реальная частота оцифровки аналогового сигнала меньше теоретической в 2 и более раз вследствие потерь времени на передачу сигнала на микросхему АЦП, запоминание кода с АЦП в выходном регистре и т.д.

Точность аналогового преобразования определяется не только разрядностью АЦП, но и реальным диапазоном изменения входного сигнала. Так, если реальный сигнал предварительно усилен до

диапазона ±5,12 В, то приведенная погрешность преобразования составит g_0 = (0,0025 В/5,12 В)100 % ≈ 0,05 %.

Если реальный сигнал меняется в пределах ±1 В, то приведенная погрешность составит соответственно 0,0025 В/1 В = 0,25 %.

Поэтому для повышения точности преобразования в АЦП сигнал нужно предварительно масштабировать до диапазона изменения ±5,12 В. Кроме того, и сам АЦП производит преобразование с погрешностями, характерными для любого преобразователя: аддитивной погрешностью нуля (погрешностью сдвига), мультипликативной погрешностью чувствительности (погрешностью усиления), погрешностью вследствие нелинейности характеристики преобразователя.

Характерной для АЦП является погрешность из-за дифференциальной нелинейности — отклонения реальных уровней дискретизации (рис. 3.42, *в*) от теоретических, или, другими словами, отклонение изменения входного сигнала, приводящего к смене выходного кода, от чувствительности.

Важным показателем АЦП является уровень шума, проявляющийся в спонтанных изменениях значений младших разрядов выходного регистра при постоянном входном напряжении. Наличие шума фактически уменьшает так называемую эффективную разрядность и реальную чувствительность АЦП на число разрядов, в которых проявляется этот эффект.

Обычно эффективная разрядность падает с ростом частоты преобразования. Так как время преобразования невелико, для опроса нескольких датчиков обычно используют один АЦП, подключаемый к нужным каналам коммутатором, или мультиплексором.

Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для преобразования дискретного по времени и уровню обычно 12-разрядного двоичного кода в непрерывный по времени и по уровню выходной сигнал. Другими словами, на вход ЦАП периодически поступают числа в интервале от −2048 до +2047, кодирующие выходное напряжение в интервале, например, от −5,12 до +5,12 В.

Цифроаналоговый преобразователь в основном применяется для преобразования сигнала от цифрового регулятора в аналоговую форму изменяющегося по времени напряжения, используемого большинством электро-, гидро- и пневмоприводов в качестве управляющего сигнала. ЦАП расшифровывает код и выдает соответствующее напряжение на выход. Как правило, ЦАП дополняется экстраполятором, запоминающим и поддерживающим неизменное напряжение, соответствующее входному коду ЦАП, до подачи нового входного кода. Выходное напряжение экстраполятора меняется обычно только в момент прихода на ЦАП нового кода.

Существуют системы, в которых один ЦАП работает совместно с несколькими экстраполяторами, подключаясь к ним через коммутатор и корректируя их выходное напряжение, однако часто при небольшом числе управляемых каналов и низкой стоимости микросхем каждому ЦАП соответствует свой экстраполятор. Как правило, ЦАП не порождает погрешностей квантования, но остальные виды общих погрешностей присущи и этим преобразователям и составляют в сумме обычно не более 1 %. Характеристикой быстродействия ЦАП является *время установления* — интервал времени между моментом изменения входного кода и моментом стабилизации выходного аналогового сигнала. Время установления обычных ЦАП составляет 2... 15 мкс.

3.7. Задающие устройства

Всякая система стабилизации, программного управления или регулирования имеет *задающее устройство*, т. е. элемент, задающий требуемое в данный момент времени значение регулируемого параметра. Для стабилизирующих систем это уставка постоянная величина (например, яркость экрана дисплея устанавливается положением регулятора яркости). Должна быть предусмотрена возможность изменения уставки в ответ на изменения в регулируемом объекте или условиях его эксплуатации.

В схемах программного регулирования роль задатчика выполняет устройство, передающее в систему заданный закон изменения управляемого параметра по времени. Например, в станках с копировальной системой (см. рис. 3.56) перемещение суппорта вызывает перемещение щупа вдоль копира. Копир имеет переменную высоту, задающую требуемый вертикальный профиль. Тогда перемещение щупа вдоль копира будет сопровождаться его вертикальным перемещением по заданному закону. Следящий гидропривод передаст перемещение щупа инструменту, который воспроизведет требуемый профиль в детали.

В простейших системах числового управления программа содержится на перфоленте в виде последовательности кодов требуемых значений параметра. В нужный момент устройство ввода считывает с перфоленты код очередного значения параметра и передает его устройству ЧПУ, которое и выступает в роли задатчика.

В системах управления, построенных на микропроцессорах, программа вводится в оперативную память микроЭВМ в табличной форме (задается последовательность значений параметра, следующих через равные интервалы времени, и длина этого интервала), или в аналитической форме (задается формула расчета значения параметра как функция времени, координат или других параметров). В процессе работы в определенные моменты времени ЭВМ рассчитывает заданное значение параметра, определяет показа-

ния датчика и сравнивает результат измерения с требуемым значением.

3.8. Исполнительные устройства

Исполнительные устройства осуществляют преобразование сигнала, усиленного усилителем мощности, в форму, удобную для воздействия на рабочий орган системы (обычно в перемещение или силу). Исполнительное устройство является конечным каскадом, последним элементом в системе управления, воздействующим непосредственно или через согласующий орган на регулирующий элемент системы, осуществляющий изменение режима функционирования управляемого объекта. Например, шаговый электродвигатель (исполнительное устройство) через редуктор коробки подач (согласующий орган) задает перемещение суппорта станка с закрепленным на нем инструментом (регулирующего элемента, рабочего органа).

По своим динамическим характеристикам исполнительные устройства обычно являются интегрирующими или инерционными звеньями. Например, система позиционирования рабочего органа по показаниям датчика текущего положения рабочего органа X и по его требуемому положению $X_{зад}$ определяет требуемое перемещение $\Delta X = X_{зад} - X$, которое через цепь преобразователей поступает на исполнительное устройство, например в виде скорости вращения вала электродвигателя и скорости перемещения рабочего органа v, в результате чего меняются его координаты $\Delta X = v\Delta t$.

При закреплении инструмента на исполнительное устройство подается управляющий сигнал, уровень которого определяет силу зажима. Например, в пневмоприводе в полость рабочего цилиндра подается сжатый газ, давление которого P (управляющий сигнал) совместно с площадью поршня S определит силу зажима $F = PS$, т.е. в первом приближении пневмоцилиндр можно считать пропорциональным звеном, а если учесть инерционность пневмосистемы за счет конечной скорости течения газа — инерционным звеном. Электродвигатель в силу механической инерции ротора также изменяет скорость вращения постепенно в ответ на скачкообразное изменение напряжения питания.

Исполнительные устройства в зависимости от характера движения выходного элемента подразделяются на три вида:

с линейным движением;

поворотным движением (угол поворота меньше 360°);

вращательным движением (угол поворота больше 360°).

Исполнительные устройства, как и другие элементы систем управления, в зависимости от вида используемой энергии делятся на электрические, гидравлические и пневматические.

К *электрическим исполнительным устройствам* относятся электродвигатели, электромагнитные муфты, электромагниты (поворотные и втяжные), электромагнитные реле, электромагнитные контакторы и другие устройства, преобразующие электроэнергию в энергию механического движения. Электрические устройства, несмотря на известные преимущества, обладают рядом недостатков, среди которых основными являются часто недостаточные мощность и быстродействие.

Гидравлические и *пневматические исполнительные устройства* по сравнению с электрическими имеют более высокую мощность (примерно на порядок), обладают быстродействием и надежностью, просты конструктивно, устойчивы к вибрациям и ударам, позволяют плавно менять выходные параметры в широком диапазоне.

В табл. 3.8 приведены ориентировочные сравнительные характеристики исполнительных устройств разного типа.

Таблица 3.8

Тип двигателя	Диапазон регулирования скорости	Максимальная частота вращения, об/мин	Выходная мощность, кВт	КПД, %
Электрический:				
постоянного тока	1 : 5	10 000	0,01 ... 1000	20 ... 85
переменного тока	1 : 20	6 000	0,1 ... 100	15 ... 40
Гидравлический:				
с силовым цилиндром	1 : 400	20 000	1 ... 100	50 ... 80
аксиальный	1 : 500	20 000	1 ... 100	50 ... 80
Пневматический:				
с силовым цилиндром	1 : 500	50 000	0,1 ... 10	40 ... 70
аксиальный	1 : 1000	50 000	0,1 ... 10	40 ... 70

При выборе исполнительного устройства сила или момент, развиваемые устройством, должны быть заведомо большими, чем сила или момент, требуемые для перемещения рабочего органа на всех режимах его работы, а быстродействие должно быть достаточным.

3.8.1. Управляемые исполнительные электродвигатели постоянного тока

Двигатели постоянного тока широко применяются в системах управления для преобразования постоянного электрического тока в механический крутящий момент на валу двигателя. Конструктивно эти двигатели состоят из статора с обмоткой возбуждения и якоря или ротора с обмоткой. Как к обмотке возбуждения, так и к якорю через щетки подводится постоянное напряжение. Взаимо-

действие магнитных полей обмотки возбуждения и якоря вызывает вращение последнего, причем направление вращения зависит от полярности включения обмоток.

Управление скоростью вращения вала двигателя осуществляется изменением тока в обмотках возбуждения и якоря на основе обратной связи по скорости вращения и обратной связи по положению рабочего органа с использованием соответствующих датчиков положения или перемещения.

При работе двигателя на номинальном режиме почти вся потребляемая двигателем энергия преобразуется в механическую энергию вращения вала. Однако при пуске двигателя, когда скорость вращения близка к нулю, сопротивление якоря мало́ и через него течет большой пусковой ток, вызывающий перегрев обмотки якоря, сильное искрение на щетках, приводящее к их разрушению, и чрезмерно большой момент на валу, эквивалентный удару и способный вызвать разрушение механических узлов привода. Во избежание этого применяют схемы, увеличивающие ток в обмотке постепенно с ростом скорости вращения. На рис. 3.43 приведена схема пуска двигателя параллельного возбуждения. Последовательно с якорем включены пусковые резисторы *R*1, *R*2, *R*3 в цепи *3*, которые могут шунтироваться контактами контакторов *У*1, *У*2, *У*3 в цепи *2*. Включением рубильника *В* напряжение питания подводится к схеме управления двигателем. При нажатии кнопки *КнП* контактор *Л* своими главными контактами включает двигатель в сеть, а блокирующими шунтирует кнопку пуска *КнП* так, что в линии *1* будет течь ток после отпускания кнопки *КнП*. Одновременно начинает течь ток через якорь двигателя и сопротивления *R*1, *R*2, *R*3 в цепи *3*. В момент пуска реактивное сопротивление якоря минимально, но ток ограничен сопротивлениями. Ток через обмотки контакторов мал и не вызывает их срабатывания. По мере того, как якорь ускоряет свое вращение, его сопротивление растет, ток в цепи *3* и падение напряжения на *R*1 уменьшаются, что вызывает увеличение тока через *У*1 в цепи *6*. При определенной скорости вращения сработает контактор *У*1, его контакты в линии *2* за-

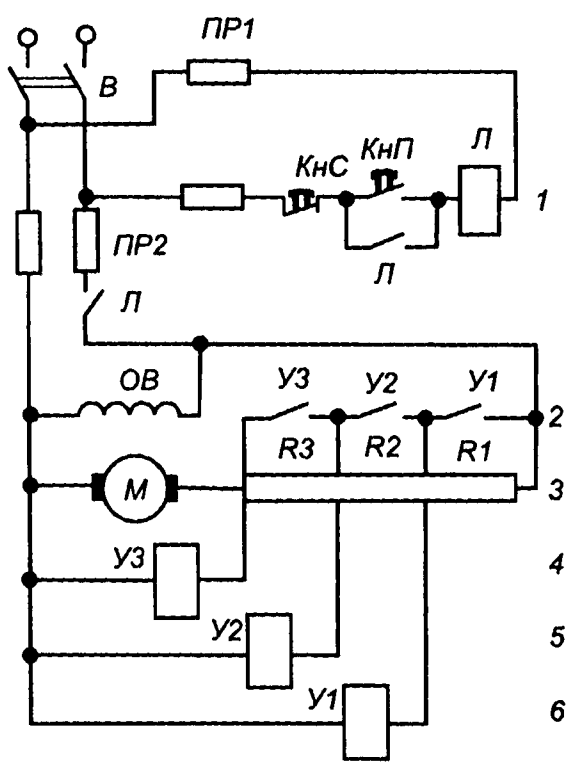


Рис. 3.43. Схема пуска электродвигателя постоянного тока

коротят *R*1, что вызовет скачкообразное увеличение тока через якорь в цепи *3*. Дальнейший разгон якоря опять вызовет падение тока в цепи *3* и включение контактора *У*2 в цепи *5*, а потом и контактора *У*3 в цепи *4*, после чего все сопротивления, ограничивающие ток в якоре, будут закорочены, а двигатель выйдет на рабочий режим.

При нажатии кнопки выключения двигателя *КнС* обесточивается катушка контактора *Л*, что вызовет размыкание его основных контактов и обесточивание двигателя, а также размыкание блокирующих контактов, шунтирующих нормально разомкнутую кнопку пуска *КнП*.

Основными требованиями, предъявляемыми к двигателям постоянного тока при их использовании в системах управления, являются линейная зависимость угловой скорости вращения ротора от напряжения питания во всем рабочем диапазоне и стабильность характеристик.

Для уменьшения инерционности двигателей, используемых в системах управления, применяют якорь малого диаметра при увеличенной длине (отношение длины якоря к диаметру двигателя может достигать 4, когда у нормальных двигателей оно составляет 1 ... 2).

Достоинствами электродвигателей постоянного тока являются:

- большой крутящий момент при сравнительно небольших габаритах;
- значительный диапазон варьирования частоты вращения;
- большой крутящий момент при пуске, что обеспечивает высокое быстродействие привода;
- высокий КПД (до 90 %).

К недостаткам этих двигателей следует отнести следующие:

- механический и электрический вследствие эрозии износ щеток и коллектора;
- как следствие, невысокие надежность и долговечность;
- необходимость постоянного ухода за коллектором и щетками;
- излучение электромагнитных помех вследствие искрового разряда между коллектором и щетками, затрудняющих работу электронных схем;
- большая масса и инерционность якоря, снижающие быстродействие.

3.8.2. Двигатели переменного тока

Принцип действия *двигателей переменного тока* основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля, создаваемого переменным током в обмотках статора (неподвижной части двигателя), с вихревыми токами, индуцируемыми в обмотках ротора (подвижной части двигателя). Электродвигатели, частота вращения которых определяется частотой вращения магнитного поля статора,

равной частоте питающего напряжения, называются синхронными, в другом случае — асинхронными.

Как и в двигателях постоянного тока, пусковой ток в двигателях переменного тока чрезмерно велик из-за малого сопротивления обмоток статора и ротора при малой скорости вращения. Пример схемы ограничения пускового тока ротора асинхронного двигателя постоянного тока приведен на рис. 3.44. Обмотка статора включена в сеть через реле максимального тока *РМ*1 и *РМ*2. Их контакты в линии *1* соединены последовательно с обмоткой контактора *Л* и обесточат ее в случае чрезмерно большого тока в цепи питания двигателя. Контакты контактора *Л* подключают статор к сети, шунтируют кнопку пуска *КнП* и включают катушку блокировочного реле *РБ* в цепи *2*. В цепь ротора включены пусковые резисторы *R*1, *R*2, *R*3, ограничивающие ток ротора, а также катушки токовых реле *РУ*1, *РУ*2, *РУ*3. Их нормально замкнутые контакты находятся в цепях *3*, *4*, *5*. В этих же цепях стоят катушки контакторов *У*1, *У*2, *У*3. Контакты этих контакторов могут замыкать секции *R*1, *R*2, *R*3.

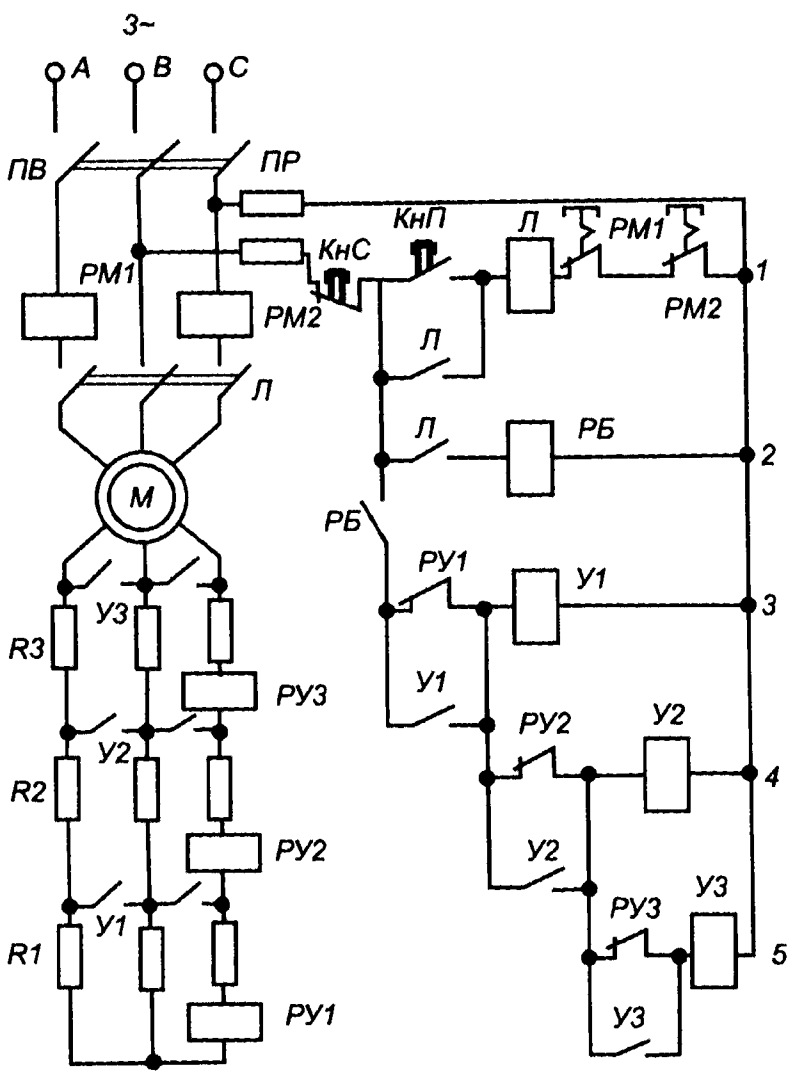


Рис. 3.44. Схема пуска асинхронного электродвигателя переменного тока

Цепь управления защищается предохранителями *ПР*. После включения пакетного выключателя и нажатия кнопки *КнП* срабатывает контактор *Л*. Его контакты подключают статор к сети и шунтируют кнопку *КнП*. Двигатель начинает вращаться, по его ротору течет большой ток, в результате чего срабатывают реле *РУ*1, *РУ*2, *РУ*3, размыкающие свои контакты в цепях *3*, *4*, *5*. Одновременно замыкаются контакты контактора *Л* в цепи *2*, что вызывает срабатывание блокировочного реле *РБ* и замыкание его контактов в цепи питания цепей *3*, *4*, *5*. Реле *РБ* обеспечивает включение питания цепей *3*, *4*, *5* только после размыкания контактов *РУ*1, *РУ*2, *РУ*3. По мере разгона двигателя ток в роторе падает. Первым отпускается реле *РУ*1, что вызовет срабатывание контактора *У*1, закорачивание секции *R*1 и скачкообразное увеличение тока ротора. По мере разгона двигателя ток в роторе опять уменьшится, что вызовет отпускание контактора *РУ*2, срабатывание реле *У*2 и закорачивание секции *R*2. Последним сработает контактор *У*3, который закоротит секцию *R*3, после чего исчезнут ограничения тока ротора, а двигатель будет находиться в рабочем режиме. Реле *У*1, *У*2, *У*3 дублируют контакторы *РУ*1, *РУ*2, *РУ*3, но они необходимы для обеспечения некоторой инерционности схемы управления, предотвращающей повторное кратковременное срабатывание контакторов *РУ*1, *РУ*2, *РУ*3 в момент скачкообразного роста тока ротора при закорачивании секций *R*1, *R*2, *R*3, что вызвало бы отпускание реле *У*1, *У*2, *У*3.

При нажатии кнопки *КнС* отпустится контактор *Л* и обесточится как статор двигателя, так и схема пуска, все реле и контакторы вернутся в исходное состояние, и цепь ротора будет готова к новому пуску.

В системах управления наибольшее применение нашли асинхронные двигатели. В зависимости от числа фаз питающего напряжения различают:

однофазные двигатели, имеющие небольшую мощность и используемые главным образом в нерегулируемых электроприводах (например, в вентиляторах);

двухфазные, в которых сравнительно легко поддается регулированию частота вращения и крутящий момент, что обусловило их широкое применение в регулируемых электроприводах устройств автоматики;

трехфазные, применяемые в нерегулируемых электроприводах мощностью до нескольких киловатт (приводы станков, компрессоров, насосов).

Синхронные электродвигатели мощностью от долей до нескольких сотен ватт используются в тех случаях, когда требуется поддерживать постоянную частоту вращения (в самописцах, механических задатчиках, лентопротяжных механизмах).

В целом электродвигатели переменного тока по сравнению с двигателями постоянного тока имеют следующие преимущества:

• более надежны и долговечны;
• широкий диапазон регулирования частоты вращения и крутящего момента;
• малые потери за счет трения;
• не создают помехи для работы электронной аппаратуры;
• менее инерционны.

Однако они (при прочих равных условиях) уступают двигателям постоянного тока по следующим параметрам:
• массе и габаритным размерам;
• КПД (обычно не более 10...25 %);
• величине пускового момента и быстродействию.

Вследствие низкого КПД эти двигатели в основном используют в стационарных устройствах, питаемых от промышленной электросети. Управление скоростью вращения двухфазных асинхронных двигателей осуществляется путем изменения напряжения питания на основе обратной связи по скорости вращения и состоянию рабочего органа.

3.8.3. Электромагниты

Электромагниты являются наиболее простыми, быстродействующими и надежными из силовых электрических исполнительных устройств. Они широко применяются для управления фиксирующими устройствами и перемещения регулирующих органов на фиксированные небольшие расстояния (управление вентилями, золотниками, схватами роботов).

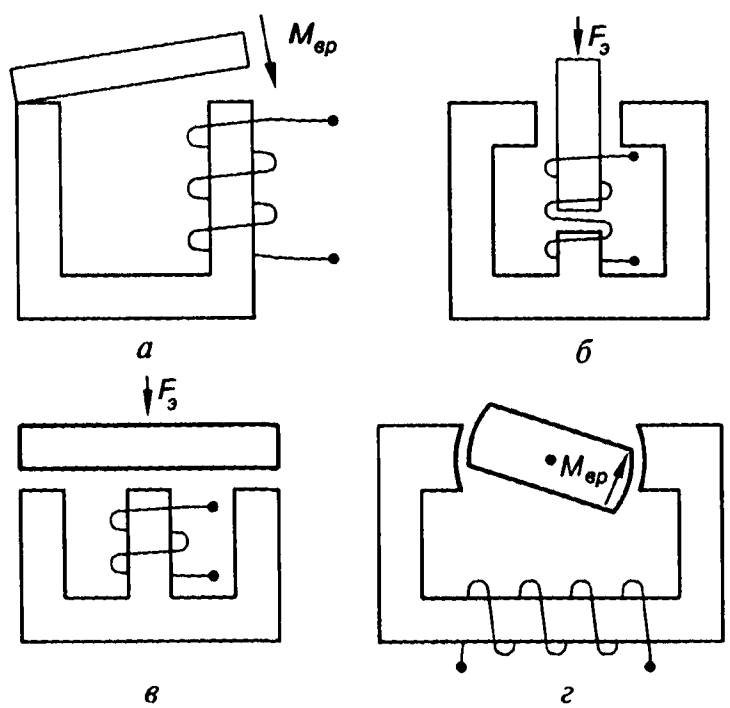


Рис. 3.45. Варианты конструктивных схем электромагнитов

Различают электромагниты постоянного (нейтральные и поляризованные) и переменного тока. Электромагниты переменного тока развивают меньшее усилие и обладают меньшей чувствительностью, чем электромагниты постоянного тока тех же габаритов, поэтому применяются реже.

По характеру движения якоря различают электромагниты с линейным (поступательным) движением (рис. 3.45, *б*, *в*) и поворотным (рис. 3.45, *а*, *г*) движением.

Электромагниты могут снабжаться дополнительными парами контактов, используемыми для сигнализации и сохранения положения якоря, а также для уменьшения тока в обмотке после срабатывания для предохранения от перегрева обмотки магнита (удержание якоря в некотором положении требует, как правило, меньшего усилия, чем изменение положения якоря).

Недостатками, присущими всем электромагнитам, являются:

- сравнительно небольшие развиваемые усилия и мощность (до сотен ватт);
- дискретный, двухуровневый характер работы (допустимы два положения якоря).

Основное применение электромагниты нашли в электрических реле.

3.8.4. Синхронные шаговые двигатели

Принцип работы шагового двигателя (ШД) напоминает работу поворотного электромагнита. Шаговый двигатель обычно состоит из трех автономно работающих секций *1*, *2*, *3* (рис. 3.46), каждая из которых включает неподвижный статор с обмоткой и ротор, причем роторы всех секций жестко закреплены на валу ШД. Ротор и статор ШД имеют полюсы (выступы), причем

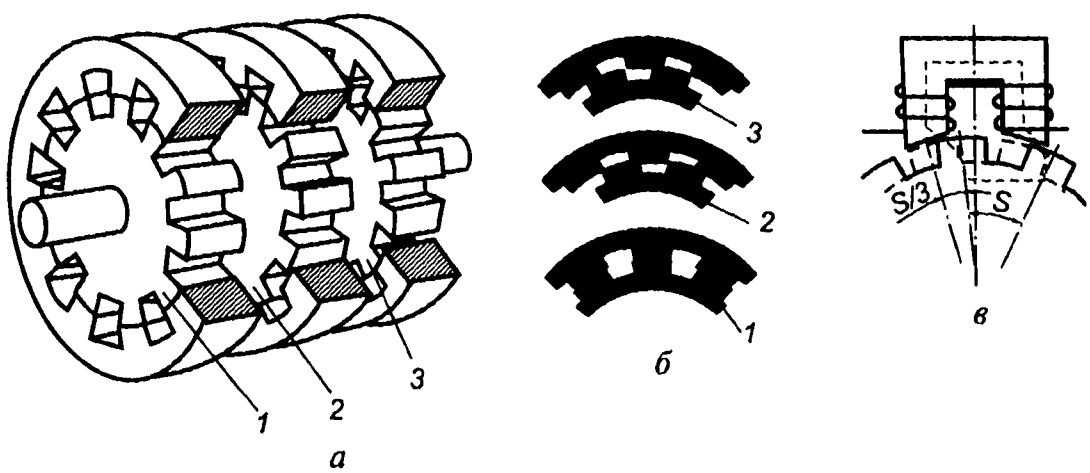


Рис. 3.46. Схема работы шагового электродвигателя:
а — общая схема; *б* — положения секций статора и ротора; *в* — схема прохождения магнитного потока

полюсы статоров секций совмещены, а полюсы роторов смещены относительно друг друга на 1/3 шага полюсов так, что если полюсы ротора первой секции совпадают с полюсами статора, то полюсы ротора второй секции сдвинуты относительно полюсов статора на 1/3 шага, а полюсы ротора третьей секции — на 2/3 шага.

При подаче импульса напряжения на обмотку статора одной из секций ротор этой секции стремится принять положение наибольшей проводимости магнитного потока в магнитной цепи статор-ротор, что вызывает совмещение полюсов ротора и статора этой секции и поворот вала ШД. Угол поворота $\Delta\varphi$ определяется числом полюсов N (измеряется в градусах):

$$\Delta\varphi = \frac{360}{3N}.$$

При подаче импульса на следующую обмотку вал ШД повернется еще на $\Delta\varphi$ и т.д. Подача импульсов напряжения на обмотки секции в требуемой последовательности и с нужной частотой выполняется электронным коммутатором.

Применение ШД целесообразно, когда требуется прерывистое стартстопное вращение с точным позиционированием (например при управлении заслонками или золотниками) или когда требуется вращение вала с заданной скоростью (например, в приводе подач станка с ЧПУ). В последнем случае управляющее воздействие на ШД имеет вид последовательности импульсов, частота которых и задает скорость вращения, а инерционность механических узлов привода подач делает вращение плавным.

Важной характеристикой ШД является его *разрешающая способность* (*приемистость*), т.е. та частота прихода управляющих импульсов, начиная с которой ШД теряет способность надежно отрабатывать каждый поступающий импульс. Например, при необходимости изменения направления вращения изменение порядка прихода импульсов на обмотки в силу инерции не вызовет мгновенного останова вала и его вращения в обратную сторону. Время, требуемое для останова и разгона вала, и определяет разрешающую способность ШД.

Разрешающая способность ШД, применяемых в приводах подач станков с ЧПУ, составляет порядка 2 кГц, хотя при плавном разгоне и равномерном движении частота уверенной отработки приходящих импульсов может достигать 8 кГц.

Единичный угол поворота ротора (на импульс) составляет от 0,5 до 10° и обычно равен $(1{,}5 \pm 0{,}5)°$. Ошибка поворота при единичном шаге может достигать 30 %, однако она не накапливается, а компенсируется ошибками на следующих шагах.

Шаговые двигатели широко применяются в цифровых системах управления, так как могут управляться импульсами, поступающими непосредственно с логических схем системы без проме-

жуточных преобразований. По сравнению с двигателями постоянного и переменного тока ШД точнее, проще, надежнее, компактнее, более устойчивы к внешним воздействиям. Однако они имеют меньший КПД и мощность (до 200 Вт) и не допускают длительных перегрузок.

3.8.5. Гидравлические серводвигатели

Гидравлические серводвигатели предназначены для преобразования энергии жидкости, находящейся под давлением, в механическую энергию поступательного или вращательного движения подвижного элемента. Это осуществляется путем подачи в одну из полостей рабочего цилиндра жидкости под давлением и обеспечения свободного слива ее из другой полости в бак. Преимуществом гидроустройств перед электромеханическими устройствами является возможность воспроизведения поступательного движения без промежуточных механизмов, чем объясняется их широкое применение (наряду с пневматическими устройствами) для осуществления возвратно-поступательных движений.

Ранее на рис. 3.34, 3.35 были приведены схемы гидродвигателей с поступательно движущимся поршнем.

Существуют гидроустройства вращательного движения, отличающиеся от электродвигателей меньшими габаритными размерами, нечувствительностью к длительным перегрузкам, простотой регулирования скорости вращения и крутящего момента. На рис. 3.47 приведена схема двигателя с поворотной лопастью. Масло под давлением P_0 поступает к цилиндрическому золотнику *1* и через трубопровод *2* (при смещении плунжера золотника вниз) — в полость *3* лопастного двигателя. Лопасть *5* под действием разницы давлений в полостях *3* и *6* начинает вращаться вместе с выходным валом *4*. Масло из полости *6* через трубопровод *7* будет вытекать в бак.

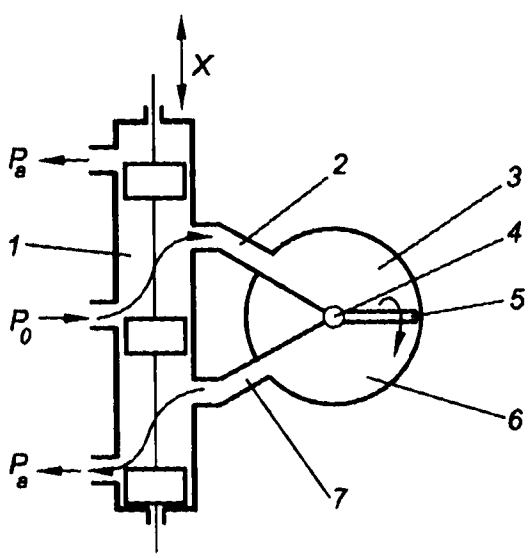


Рис. 3.47. Схема серводвигателя с поворотной лопастью:
1 — золотник; *2* — трубопроводы; *3* и *6* — полость; *4* — выходной вал; *5* — лопасть; *7* — трубопровод

На рис. 3.48 приведена схема ротационного гидродвигателя. В корпусе *1* установлен ротор *2*, ось вращения которого смещена от-

носительно центра корпуса. В пазы ротора помещены пластины *3*. Масло под давлением поступает по трубопроводу *4*, сливается в бак по трубопроводу *5*. За счет разности давлений справа и слева от пластины ротор с валом вращаются против часовой стрелки. При вращении ротора пластины прижимаются центробежными силами к внутренней поверхности корпуса, что обеспечивает уплотнение. Для улучшения уплотнения под пластины в роторе устанавливают пружины или подводят рабочую среду под давлением.

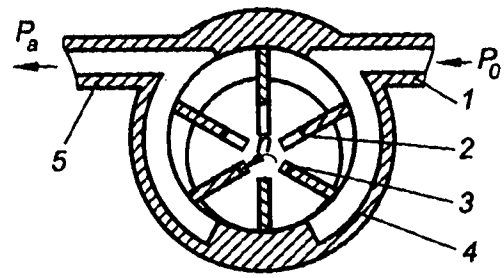


Рис. 3.48. Ротационный серводвигатель:
1 — корпус; *2* — ротор; *3* — пластины; *4* и *5* — трубопровод

Рис. 3.49 иллюстрирует работу аксиально-поршневого гидродвигателя. В статоре *7* расположены поршни *1*, *2*, *3*, *4*, *5*, перемещающиеся в осевом направлении. Под действием давления масла поршни упираются в кольцо *8*, закрепленное на валу двигателя *6* под углом. Подачей и сливом масла управляет распределитель, состоящий из двух дисков, один из которых закреплен на статоре, другой — на валу. При открытом сливе масла из-под поршней *3*, *4*, *5* и подаче масла под давлением под поршни *1*, *2* последние скользят по наклонной плоскости кольца, вызывая поворот коль-

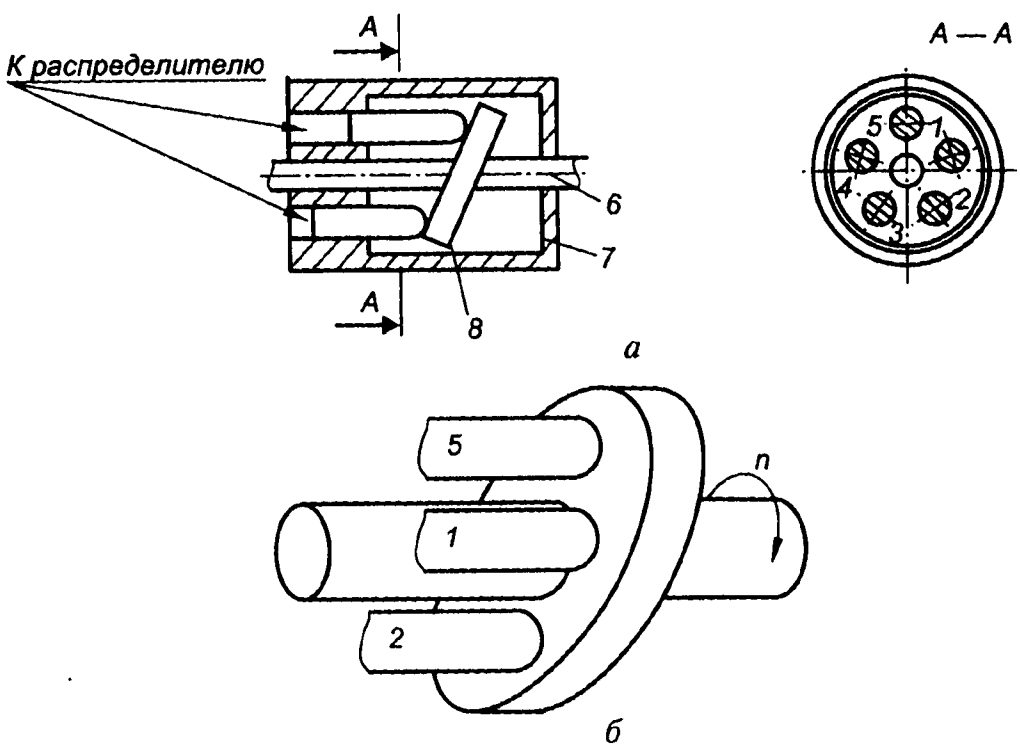


Рис. 3.49. Аксиально-поршневой двигатель:
1 — *5* — поршни; *6* — двигатель; *7* — статор; *8* — кольцо

ца и вала двигателя по часовой стрелке. Распределитель управляет временной последовательностью подачи и слива масла из рабочих полостей, регулируя скорость вращения вала в прямом или обратном направлении.

В гидродвигателях в качестве рабочей среды используют жидкости, обладающие хорошей смазывающей способностью: минеральное масло, спиртоглицериновую смесь, синтетические жидкости. Давление масла в гидроприводах станков составляет 30...50 бар, скорость течения масла в трубопроводах достигает 5 м/с. Для регулирования скорости перемещения поршня используют дроссель (регулируемое гидравлическое сопротивление), установленный в трубопроводе и меняющий количество жидкости, проходящей в гидродвигатель или из него в единицу времени.

3.8.6. Пневматические серводвигатели

Пневматические серводвигатели предназначены для преобразования энергии сжатого газа (воздуха) в механическую энергию поступательного или вращательного движения. Конструктивно пневмодвигатели подобны гидродвигателям, рассмотренным выше. Пневмоустройства менее инерционны вследствие малых вязкости и удельного веса газа по сравнению с маслом, но в силу сравнительно невысокого давления газа эти устройства не развивают больших усилий.

Пневмодвигатели не способны точно воспроизвести заданный закон движения при больших рабочих усилиях из-за сжимаемости газа (сильной зависимости объема газа от давления). Например, увеличение нагрузки на поршень со стороны рабочего органа вызовет дополнительное сжатие газа для увеличения давления под поршнем, что внесет погрешность в кинематику движения поршня.

Типичным исполнительным устройством этого типа является пневмоцилиндр общепромышленного назначения. Скорость перемещения поршня составляет 1...10 м/с, диаметр цилиндра колеблется от 0,01 до 0,3 м, ход поршня составляет от нескольких миллиметров до 2...3 м, срок службы — до 10 млн ходов. Давление питания в исполнительных устройствах обычно равно давлению воздуха в заводской сети (4...10 бар) (атмосферное давление $P_{атм} \approx 1$ бар $= 100$ кПа $= 100\,000$ Па $= 10^5$ Н/м$^2 \approx 10^4$ кгс/м$^2 = 1$ кгс/см^2, однако в некоторых случаях (например, в авиатехнике) оно доходит до 60...100 бар). Скорость течения газа в трубопроводах достигает 40 м/с.

Наряду с поршневыми широко применяются пневмодвигатели с упругими элементами в виде металлических или неметаллических мембран и сильфонов.

На рис. 3.50 изображен односторонний пневмодвигатель с тарельчатой резинотканевой мембраной. При подаче сжатого возду-

ха из магистрали по трубопроводу *4* мембрана *6* прогибается вправо; шток *2*, жестко связанный с металлическим центром мембраны *5*, перемещается на заданный рабочий ход *S* (до упора *3*). Обратный ход мембраны совершается под действием пружины *1*.

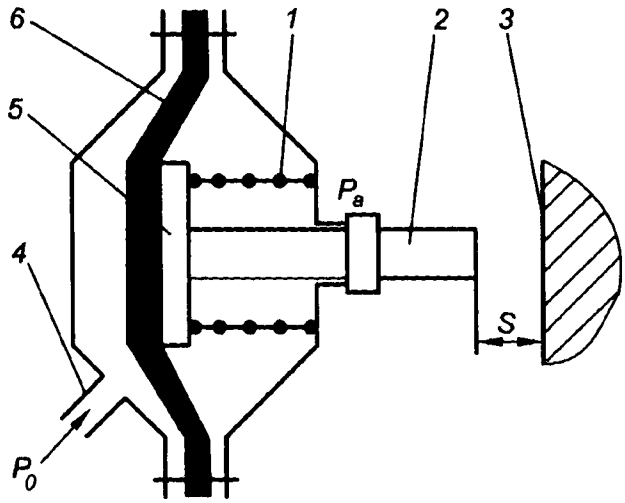


Рис. 3.50. Мембранный пневмодвигатель: *1* — пружина; *2* — шток; *3* — упор; *4* — трубопровод; *5* и *6* — мембрана

Наряду с односторонними существуют двусторонние мембранные двигатели, в которых обратный ход совершается также под действием сжатого воздуха. Мембранные двигатели по сравнению с поршневыми имеют ограниченный рабочий ход, в случае применения неметаллических мембран требуется редуктор для уменьшения давления сжатого воздуха. Однако эти устройства просты в изготовлении, герметичны, долговечны.

3.9. Исполнительные механизмы

Исполнительные механизмы, или *сервоприводы*, состоят из цепи усилителя, переключателя и исполнительного устройства и предназначены для усиления слабого управляющего сигнала от регулятора или блока сравнения (доли ватт) до мощности, необходимой для воздействия на объект управления (до нескольких киловатт), возможно, с преобразованием сигнала в другую форму и передачи его на исполнительное устройство, воздействующее через рабочий орган на объект управления. Хотя для анализа системы управления удобно представлять привод совокупностью типовых элементов, однако конструктивно — это, как правило, единое устройство, для которого указан вид и уровень входного и выходного параметров.

Приводы по виду выходного параметра делятся на силовые и параметрические.

Силовые приводы создают на выходе силу или момент, которые обычно фиксируют положение рабочего органа (РО). Силовые приводы строят на базе электромагнитов, электромеханических муфт и различного вида двигателей.

Параметрические приводы предназначены для изменения состояния РО:

параметров самого РО (положения, скорости, температуры, электрического сопротивления);

параметров энергии, подводимой к РО (напряжения, тока, частоты, фазы в случае электрических устройств, давления газа или масла в пневмо- или гидросистемах).

Например, в системе управления температурой электропечи регулируемым параметром является температура в печи, исполнительным механизмом — усилитель, с выхода которого электроэнергия подается на регулирующий орган — нагревательный элемент печи. Температура в печи сравнивается с заданной. По результату сравнения в регуляторе вычисляется требуемое изменение напряжения на нагревательном элементе, которое и воспроизводится усилителем.

Основными техническими показателями приводов являются:

- быстродействие;
- точность;
- диапазон линейного или углового перемещения рабочего органа;
- частота вращения;
- максимальная полезная мощность;
- максимальная и номинальная нагрузка;
- коэффициент усиления по мощности;
- мощность управления;
- КПД (приводы являются основным потребителем энергии в системе управления);
- ресурс работы и т.д.

В конкретных случаях разные факторы играют определяющую роль при выборе исполнительного механизма.

Сервоприводы делят на приводы с поступательным и вращательным движением. Приводы с вращательным движением в свою очередь делят на приводы с постоянной и с пропорциональной скоростью. В последнем случае скорость вращения двигателя пропорциональна входному параметру.

Сервопривод использует один или несколько сторонних источников питания (электросеть, пневмосеть). Обычно стремятся построить привод на элементах, использующих сигналы одной формы: электропривод, гидропривод, пневмопривод. Однако это не всегда удается, поэтому широко распространены комбинированные приводы — электрогидравлические, электропневматические и пневмогидравлические. Примером комбинированного привода является электрогидравлический привод станка с ЧПУ.

В состав привода входят:

электронный цифровой блок управления обмотками шагового двигателя для обеспечения заданных направления и скорости вращения;

маломощный шаговый электродвигатель, преобразующий управляющие импульсы в угол поворота ротора;

гидроусилитель (следящий гидропривод), воспроизводящий угол поворота, но с мощностью, достаточной для перемещения суппорта.

Примером электропневмопривода является привод, в состав которого входит усилитель постоянного тока, усиливающий сигнал с регулятора до мощности, достаточной для срабатывания электромагнита, управляющего переключателем золотникового или струйного типа, и рабочего цилиндра с поршнем, вызывающим перемещение рабочего органа.

Примером пневмогидравлического привода служит привод, в котором используется быстродействующее пневматическое устройство управления, а силовая часть является гидравлической.

Существуют пневмогидросистемы, в которых быстрое перемещение рабочего органа выполняется за счет пневмопривода. При приближении РО к конечной точке включается гидропривод, осуществляющий точное позиционирование РО.

3.9.1. Электропривод

Электроприводом называется привод, все элементы которого используют в качестве источника питания электросеть.

В состав электропривода входят:

- переключатели — рубильники, кнопки, реле, ключи;
- регуляторы — переменные резисторы, индуктивности, емкости и трансформаторы;
- электрические датчики контроля температуры, момента и пр.;
- элементы защиты (предохранители, автоматические выключатели и реле защиты);
- логические элементы — электромагнитные реле, полупроводниковые элементы;
- усилители — электронные, магнитные и др.;
- электродвигатели.

По роду тока электроприводы делят на приводы постоянного и переменного тока. По способу замыкания приводы делят на контактные, в которых цепь замыкается механическим контактом электродов, и бесконтактные на базе полупроводниковых ключей. Контактные приводы распространены шире ввиду их простоты.

Электропривод металлорежущих станков включает электродвигатель с электронным блоком управления скоростью вращения ротора и коробку скоростей, обеспечивающую регулирование скорости вращения главного движения и скоростей подач. Широко применяется ступенчатое регулирование скорости, когда асинхронный двигатель работает на одной из нескольких допустимых скоростей, а требуемая скорость задается передаточным отношением коробки скоростей. Точная установка скорости при этом невозможна, однако привод имеет высокий КПД, прост и надежен

в эксплуатации. Широко применяются также приводы на базе регулируемых электродвигателей постоянного тока, развивающих большую мощность в широком диапазоне скоростей вращения. Электроприводы с шаговым двигателем в качестве исполнительного устройства в станках применяются сравнительно редко ввиду недостаточной для обработки мощности шаговых двигателей.

3.9.2. Гидропривод

Гидропривод включает в себя:

- электродвигатель с насосом для подачи жидкости под давлением в нагнетательную полость;
- предохранительный клапан, установленный в нагнетательной полости и обеспечивающий заданное давление жидкости в полости;
- фильтр для очистки рабочей жидкости;
- золотниковый или струйный распределитель, управляющий подачей и спуском жидкости из полостей рабочего цилиндра;
- рабочий цилиндр;
- сливной бак, трубопроводы, клапаны, манометр и т.д.

Входным сигналом является обычно механическое перемещение щупа или якоря электромагнита. В качестве внешнего источника энергии выступает электросеть.

Гидроприводы отличаются малыми габаритными размерами при высокой выходной мощности и быстродействии и способностью к точному позиционированию рабочего органа. Кроме того, работа этих приводов не сопряжена с вредными воздействиями на окружающую среду (шум, вредные выделения и т.п.).

3.9.3. Пневмопривод

Источником питания пневмопривода является заводская пневмосеть с давлением воздуха 4... 10 бар. Простейшие распределители и клапаны используют давление заводской сети, что не требует применения редукторов для снижения давления воздуха и обеспечивает высокие усилия.

В конструкцию пневмопривода входят:

- фильтр;
- редуктор, при необходимости понижающий давление воздуха до требуемого уровня;
- масленка, в которой воздух насыщается маслом;
- золотниковый или струйный распределитель;
- пневмодвигатель.

Типовой пневмопривод строится по схемам, приведенным на рис. 3.34, где вместо масла в золотник подается сжатый газ. Отработанный газ выпускается непосредственно в атмосферу. Плунжер

распределителя может перемещаться как сжатым воздухом, так и с помощью электромагнитов, что удобно в системах с электрическими элементами управления.

Различают главные распределители, соединяющие рабочие полости пневмодвигателя с магистралями, и вспомогательные, управляющие главными распределителями.

По сравнению с гидравлическими пневмоприводы обладают следующими преимуществами:

выше быстродействие;

ниже стоимость;

меньше длина возвратных линий (воздух выпускается в атмосферу из любой точки системы);

используется легко доступная рабочая среда — воздух.

Их недостатки по сравнению с гидравлическими приводами:

при равных габаритных размерах развивают меньшие усилия (давление воздуха в приводах обычно меньше давления масла);

не способны точно воспроизвести заданный закон движения при больших рабочих усилиях вследствие сжимаемости газа;

сильно шумят при работе, что связано с выпуском в атмосферу отработанного воздуха;

неизбежные утечки воздуха снижают КПД пневмосистем.

Пневмоприводы просты конструктивно, дешевы, надежны, обладают сравнительной легкостью эксплуатации и обслуживания, гибкостью в применении. Эти приводы широко применяются при автоматизации производственных процессов в качестве зажимных и транспортирующих механизмов, а также в ручных инструментах (гайковертах, дрелях, отбойных молотках и т.д.). Они незаменимы при автоматизации процессов, протекающих в агрессивных средах, в условиях пожаро- и взрывоопасности, при радиации, сильных вибрациях и высоких температурах.

Пневмоприводы вращательного движения отличаются от электродвигателей меньшими габаритами, нечувствительностью к длительным перегрузкам, простотой регулирования скорости вращения и крутящего момента. Таким образом, пневмоприводы применяют в случаях, когда требуется высокое быстродействие при средней мощности и низких требованиях к кинематической точности, в частности в зажимных устройствах.

3.10. Системы автоматического регулирования

На рис. 3.51 приведена типовая блок-схема системы автоматического регулирования. Для получения информации о ходе производственного процесса применяют датчик *9*, или первичный преобразователь информации — элемент автоматики, преобразующий контролируемую физическую величину *У* (геометрический размер, температуру, давление и т.д.) в некоторый сигнал, удоб-

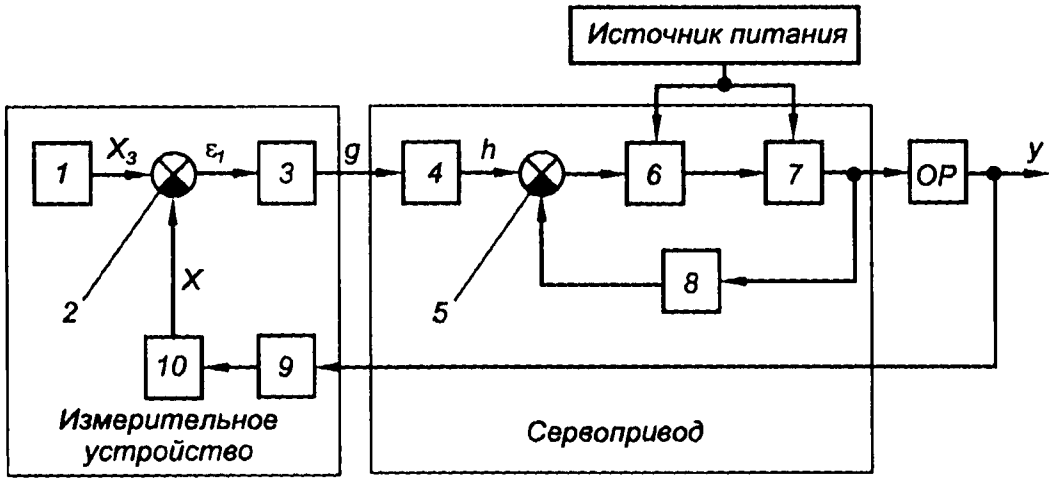


Рис. 3.51 Типовая функциональная система САР

ный для последующей обработки. В преобразователе *10* сигнал от датчика преобразуется в форму $X(t)$, удобную для обработки в сравнивающем устройстве *2* для определения рассогласования $\varepsilon_1 = X_3(t) - X(t)$ с программным сигналом управления $X_3(t)$, поступающим с задающего устройства *1*. Преобразователь (усилитель) *3* согласует сигнал ε_1 со входом последовательного корректирующего устройства *4*, вырабатывающего управляющий сигнал $h(t)$ в соответствии с изменением рассогласования во времени. В усилителе *6* управляющий сигнал усиливается до мощности, достаточной для приведения в действие переключающего устройства (например, электромагнитного реле) и (или) исполнительного устройства *7* (например, электродвигателя). В исполнительном устройстве сигнал преобразуется в силу или крутящий момент, который вызывает перемещение рабочего органа (например, суппорта станка с закрепленным на нем инструментом), оказывающего непосредственное воздействие на объект регулирования *ОР* (процесс механической обработки заготовки). Для повышения качества регулирования элементы системы могут быть охвачены корректирующей обратной связью *8*.

Систему автоматического регулирования принято рассматривать как состоящую из следующих частей:

- объекта регулирования;
- измерительного устройства, включающего задающее устройство *1*, датчик регулируемого параметра объекта *9* с преобразователем *10* и сравнивающего устройства *2*;
- следящего сервопривода, состоящего из корректирующего устройства *4*, усилителя *6* и исполнительного устройства *7*.

Обратная связь *9*, *10* называется главной, поскольку по ней формируется сигнал рассогласования, определяющий работу всей системы. Вспомогательные обратные связи (например, *8*) называют внутренними.

Рассмотренная система регулирования управляет передачей энергии от источника питания рабочему органу при незначительной мощности программного управляющего воздействия. В сервоприводе регулятор по рассогласованию вырабатывает управляющий сигнал, усилитель усиливает его до требуемой мощности за счет внешнего источника энергии, исполнительное устройство преобразует сигнал в механическое воздействие на рабочий орган. Следящий привод может использоваться для воспроизведения входного управляющего сигнала с усилением его по мощности. Например, перемещение щупа, задаваемое копиром гидрокопировального станка, воспроизводится следящим гидроприводом, но усилие на инструменте многократно превышает усилие на копире.

Сервопривод сам является системой автоматического регулирования с одной или несколькими обратными связями.

3.10.1. Регуляторы

Регуляторы — это последовательные корректирующие элементы в системах регулирования, применяемые для обеспечения устойчивости и требуемых динамических характеристик системы. Регуляторы устанавливают как в прямой цепи управления, например, для преобразования рассогласования в управляющее воздействие, так и в цепях обратных связей.

Законом управления регулятора называют зависимость, используемую при выработке выходного сигнала по входному сигналу. Регуляторы позволяют корректировать такие присущие конкретной системе и объекту управления свойства, как инерционность, неустойчивость, чувствительность к возмущениям.

Наиболее распространенным законом управления является пропорциональный закон (обозначаемый П):

$$h = k_p g,$$

где h — выходной сигнал регулятора; k_p — передаточный коэффициент пропорционального звена регулятора (см. рис. 3.51); g — входной сигнал регулятора.

Управляющее воздействие прямо пропорционально ошибке регулирования, его знак совпадает со знаком ошибки. Если заданный сигнал X_3 больше реального X, т.е. $\varepsilon_1 > 0$ и $g > 0$, то $h > 0$, и система управления будет стремиться увеличить выходной сигнал, причем тем интенсивней, чем больше ошибка ε_1. Задавая разные значения k_p — передаточного коэффициента пропорционального звена регулятора (см. рис. 3.51), можно изменять реакцию системы на изменение входного параметра X_3.

На рис. 3.52, *а* приведено изменение выходного параметра X в ответ на изменение входного параметра X_3 по трапеции. Видно, что при больших значениях k_p — передаточного коэффициента

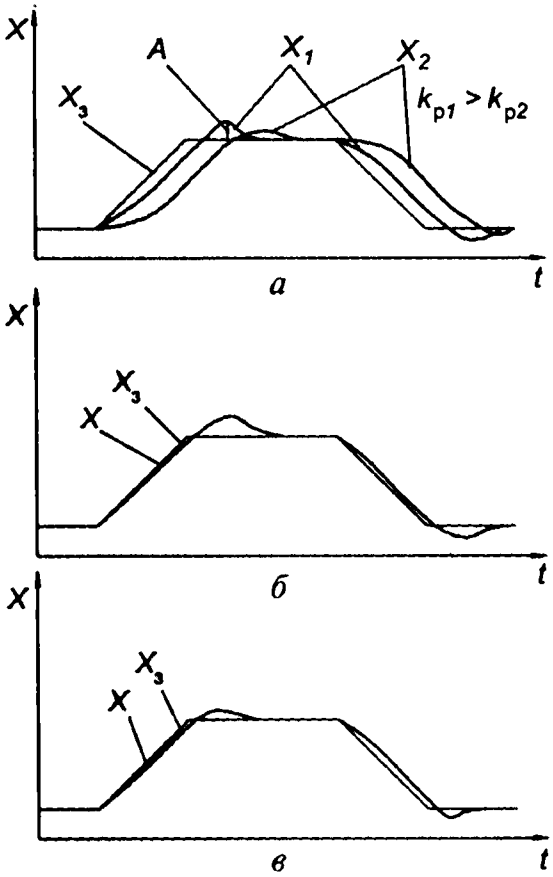


Рис. 3.52. Регулирование с использованием П-регулятора (*а*), ПИ-регулятора (*б*) и ПИД-регулятора (*в*)

пропорционального звена регулятора (кривая $X_1(t)$) меньше отставание выходного сигнала от входного, но больше перерегулирование A.

Для устранения медленно меняющейся ошибки регулирования постоянного знака типа отставания по фазе применяют пропорционально-интегральный закон управления (обозначаемый ПИ): управляющее воздействие складывается из двух составляющих: составляющей, пропорциональной текущей ошибке, и составляющей, пропорциональной накопленной ошибке (рис. 3.52, *б*).

В этом случае

$$h = k_p g + k_i \int_0^t g\, dt,$$

где k_i — передаточный коэффициент интегрирующего звена.

Пусть замер выходного сигнала X, сравнение его с заданным $X_з$ и выработка управляющего воздействия h производятся периодически через интервал времени Δt (именно так работает система управления, построенная на базе ЭВМ). Тогда очередное значение h_i вычисляется по формуле

$$h_i = k_p g_i + k_i \sum_{j=0}^{i} g_j \Delta t,$$

где i — номер текущего момента времени.

Чем дольше сохраняется ошибка регулирования постоянного знака, тем больше вклад интегрирующего звена в управляющее воздействие и тем интенсивнее регулятор стремится устранить эту ошибку.

Для устранения быстро меняющихся ошибок, возникающих при смене характера изменения входного параметра $X_з$, регулятор дополняют дифференциальной составляющей. Такой регулятор воспроизводит пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД):

$$h = k_p g + k_i \int_0^t g\, dt + k_d \frac{dg}{dt},$$

где k_d — передаточный коэффициент дифференцирующего звена регулятора.

В случае управления через интервал времени Δt

$$h_i = k_p g_i + k_i \sum_{j=0}^{i} g_j \Delta t + k_d \frac{g_i - g_{i-1}}{dt}.$$

Чем больше скорость изменения разницы $X_з - X$ и g, тем больше вклад дифференциальной составляющей в управляющее воздействие.

Значения коэффициентов k_p, k_i, k_d, определяющих работу регулятора и всей системы управления, в каждом случае подбирают индивидуально для обеспечения заданного качества регулирования с сохранением устойчивости системы управления. Легко установить, что при увеличении этих коэффициентов ошибка регулирования уменьшается. Однако рост коэффициентов в конце концов приводит к потере системой управления устойчивости — возникновению в системе колебаний сигналов с возрастающей амплитудой (разрушительные вибрации, рост шума в системе микрофон—усилитель—динамик и т.д.), т.е. у каждой системы имеется область устойчивой работы, выход за которую означает нарушение работы системы.

Область устойчивости конкретной системы управления можно найти экспериментально (при ее поиске возможно разрушение системы), аналитически (что требует детального теоретического анализа поведения системы) или численным моделированием на ЭВМ с использованием специальных моделирующих программ. Последний подход используется все чаще в связи со снижением стоимости и распространением вычислительной техники.

3.10.2. Средства управления

Важной особенностью работы большей части технологического оборудования является *цикличность* — многократное повторение определенной последовательности действий, обеспечивающих обработку детали с заданной точностью, производительностью и себестоимостью. Например, токарная обработка сводится к следующему циклу: установка и закрепление заготовки, подвод инструмента, рабочий ход (собственно точение), отвод инструмента, удаление детали.

При ручном управлении технологическим оборудованием рабочий преобразует информацию чертежа детали в действия по управлению рабочим циклом станка, используя свои опыт и знания о методах обработки, последовательности выполнения технологических переходов, применяемых режимах обработки, особенностях станка и инструмента. При этом обеспечивается большая

универсальность и высокая мобильность: простота перехода на обработку другой детали, учет рабочим изменений в чертеже и т.д.

Производительность и качество обработки в этом случае определяются мастерством и работоспособностью рабочего, которые ограничены и весьма нестабильны, что является непреодолимой преградой на пути повышения производительности и обеспечения качества обработки.

При использовании систем автоматического управления рабочий цикл выполняется под управлением автомата по заранее разработанной и записанной на программоноситель программы (копир, кулачок, данные на магнитном диске и т.д.). Управляющая программа (УП) — это последовательность команд, обеспечивающих заданное функционирование рабочих органов станка для выполнения технологического процесса.

Простейшими системами автоматического управления являются механические копировальные системы (рис. 3.53). В этих системах при обработке детали *1* плоский копир *2* через щуп *3* (толкатель) управляет перемещением поперечного суппорта *5* с режущим инструментом и обеспечивает требуемую поперечную подачу S_x при перемещении продольного суппорта *4* с подачей S_z. Система дополняется линейкой *8*, перемещающейся вместе с продольным суппортом, на которой расположены путевые упоры *7*, воздействующие в определенные моменты времени на переключатели *6*. Упоры, проходя мимо неподвижных конечных переключателей, сигнализируют о завершении очередного этапа цикла, вызывают автоматический останов подачи, выполнение холостого хода и т.д.

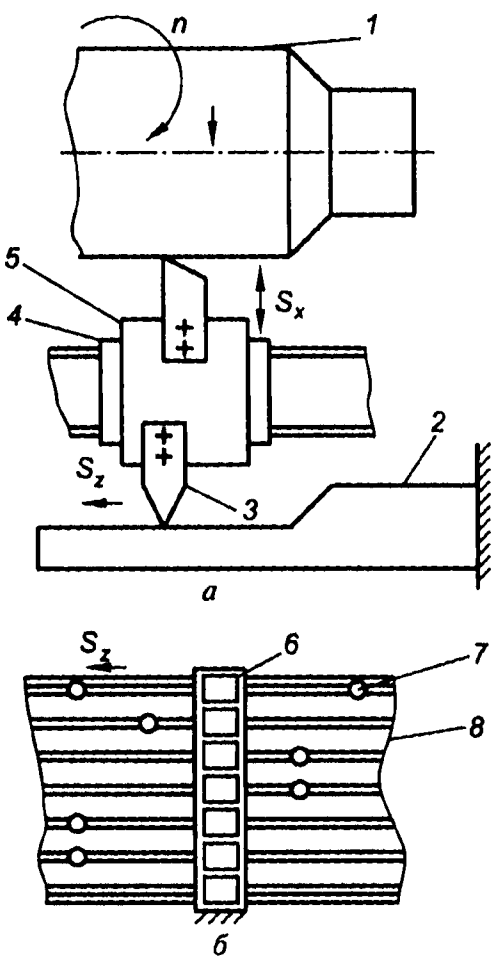


Рис. 3.53. Механическая копировальная система:
1 — деталь; *2* — копир; *3* — щуп; *4* и *5* — суппорт; *6* — переключатель; *7* — упор; *8* — линейка

Так как реальные щуп и инструмент имеют радиусы скругления, фактическая обработка происходит по эквидистантам (рис. 3.54). Для обеспечения точности воспроизведения заданного профиля не-

обходимо, чтобы радиусы скругления щупа $R_{щ}$ и инструмента $R_{и}$ (резца, фрезы) были равны и не превышали минимальный радиус скругления профиля копира $R_{к}$.

Эти системы конструктивно просты и надежны, однако при их работе возникают большие потери на холостые ходы для возврата копира в исходное положение перед началом нового цикла.

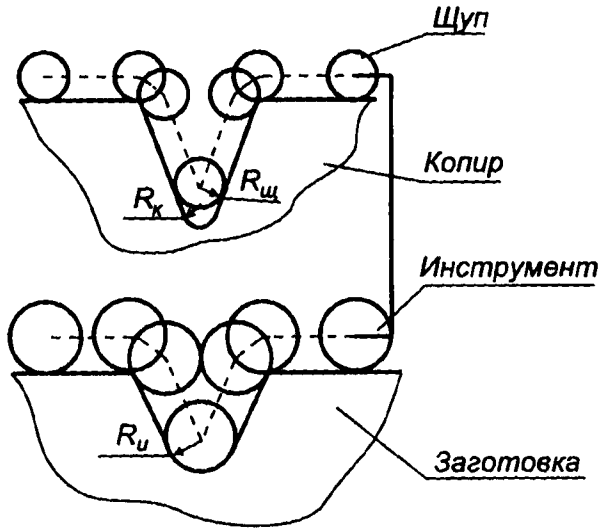


Рис. 3.54. Влияние соотношения размеров профилей копира, щупа и инструмента на точность обработки

Если в качестве копиров взять кулачки, жестко закрепленные на общем валу, называемом распределительным, то при вращении вала кулачки могут управлять большим количеством различных рабочих органов с надежной синхронизацией всех движений цикла при обработке детали (как рабочих, так и вспомогательных). При этом обеспечивается требуемая скорость перемещения рабочих органов, заданный порядок переходов и цикличность процесса обработки (1 цикл на 1 оборот вала).

По заданной программе управления из карты наладки рассчитывается форма кулачков; их взаимное расположение определяется циклограммой.

На рис. 3.55 приведены эскизы дискового (*а*) и барабанного (*б*) рабочих кулачков, а также развертка барабанного кулачка (*в*). Перемещения рабочих органов задаются изменением радиусов рабочего дискового кулачка (см. рис. 3.55, *а*) или формой канавки барабанного кулачка (см. рис. 3.55, *б*), скорость перемещения определяется скоростью вращения распределительного вала и углами α, β_1, β_2 дискового кулачка, а также длиной $L_{х.х1}$, $L_р$, $L_{х.х2}$ барабанного кулачка ($L_{х.х1}$ — подвод инструмента, α, $L_р$ — рабочий ход, β_2, $L_{х.х2}$ — отвод инструмента, см. рис. 3.55, *в*).

Помимо рабочих кулачков используются командные кулачки (см. рис. 3.55, *г*), вызывающие переключение в нужный момент (момент прохождения упора *2* на командном кулачке *3* мимо неподвижного переключателя *1*), например для изменения скорости вращения самого распределительного вала или шпинделя станка.

Системы управления с распределительным валом относятся к системам разомкнутого типа, так как не используют данных о регулируемом объекте (нет цепи обратной связи). Вследствие высокой сложности и стоимости расчета и изготовления кулачков распределительного вала применение этих систем экономически

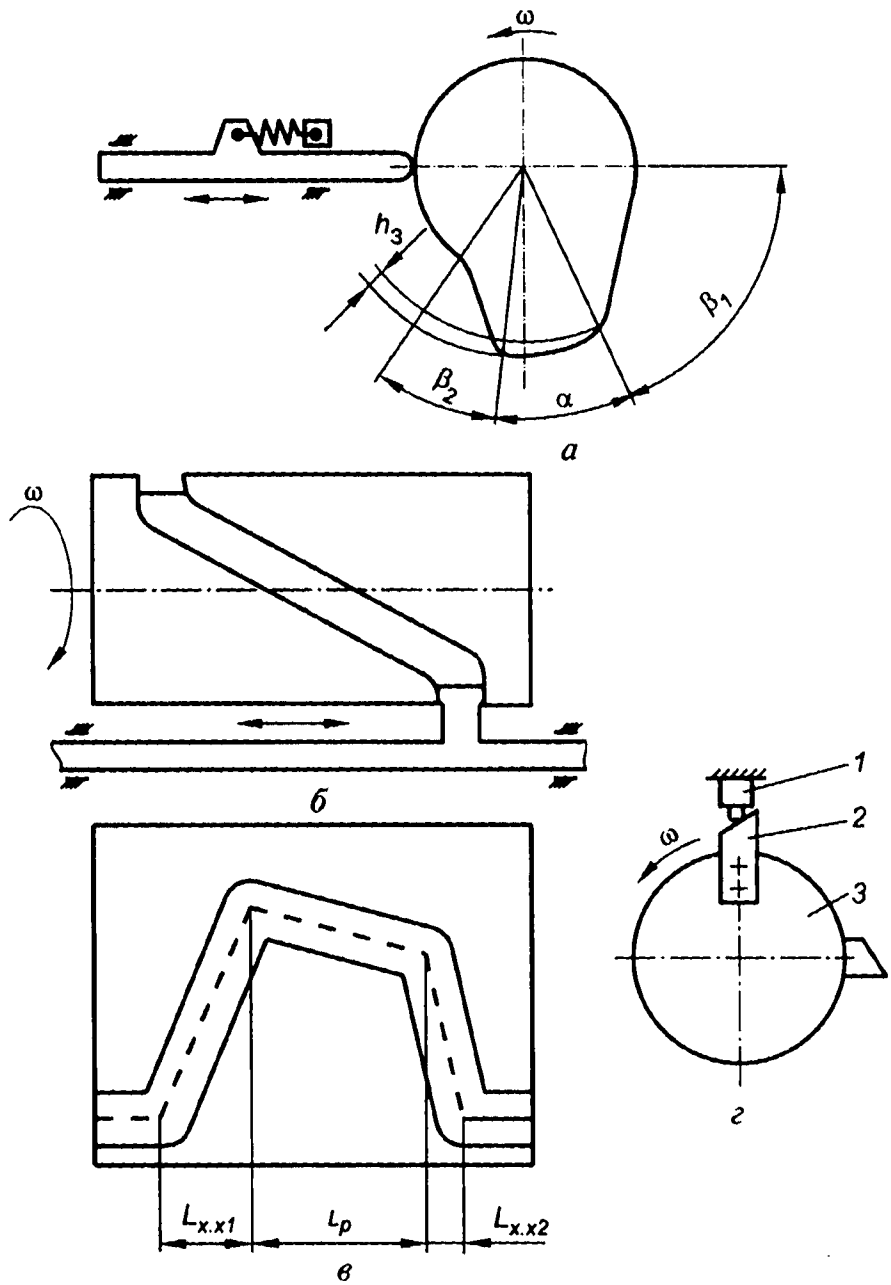


Рис. 3.55. Кулачки распределительного вала:
а — дисковый; *б*, *в* — барабанный; *г* — командный (*1* — переключатель; *2* — упор; *3* — кулачок)

оправданно в массовом и крупносерийном, реже в серийном, производстве. Серьезным недостатком механических копировальных систем, ограничивающим их применение, является быстрый износ копира из-за действия на него сил резания, передаваемых от резца к щупу через механику системы управления.

В следящих системах управления на основе электро-, гидро- или пневмопривода копир и щуп выступают только в виде задатчика перемещения, а функцию рабочей подачи выполняет силовой следящий привод. Сила давления щупа на копир в этом случае невелика, что упрощает изготовление копира, уменьшает его из-

нос и продлевает срок службы, а также повышает точность обработки. Существуют следящие системы управления как одномерной, так и многомерной (объемной) обработкой.

Для изготовления копира можно применять легко обрабатываемые, в том числе синтетические материалы. Часто вместо копира используют первую деталь, изготовленную при управлении вручную.

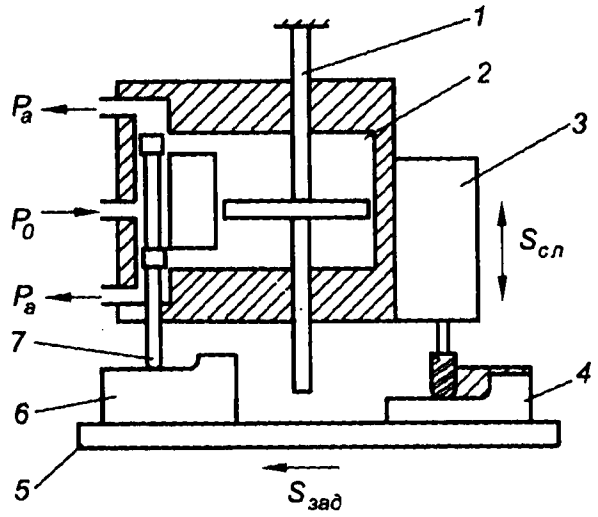


Рис. 3.56. Следящий гидропривод:
1 — шток; *2* — гидроцилиндр; *3* — бабка; *4* — заготовка; *5* — стол; *6* — копир; *7* — щуп

Схема простейшей гидравлической следящей копировальной системы показана на рис. 3.56. Щуп *7*, связанный со следящим распределителем, скользит по поверхности копира *6*, установленного вместе с заготовкой *4* на столе *5*, имеющем задающую подачу $S_{зад}$. В среднее окно корпуса распределителя насос подает масло под давлением P_0, а через верхнее и нижнее окна происходит слив масла. Следящая подача $S_{сл}$ шпиндельной бабки *3* с фрезой обеспечивается следящим гидроцилиндром *2*, поршень со штоком *1* которого неподвижен (закреплен на колонне станка).

На горизонтальном участке копира, когда рассогласования между требуемым и реальным положениями рабочего органа нет, плунжер находится в среднем положении. При этом закрыта подача масла от насоса и закрыт слив масла из обеих полостей гидроцилиндра, а следящая подача $S_{сл} = 0$. При перемещении щупа вверх или вниз открывается подача масла под давлением соответственно в верхнюю или нижнюю полость гидроцилиндра, что вызывает перемещение вверх или вниз цилиндра вместе с шпиндельной бабкой и корпусом распределителя до тех пор, пока плунжер распределителя не окажется снова в нейтральном положении и не перекроет подачу масла под давлением в гидроцилиндр.

В этой системе реализован принцип управления с обратной связью, осуществляемой закреплением корпуса распределителя непосредственно на шпиндельной бабке.

Развитием систем с распределительным валом являются системы циклового программного управления. Размерная информация (величина требуемых перемещений рабочих органов, моменты переключения режимов работы) задается профилем копиров и положениями путевых упоров на специальных линейках или барабанах, перемещающихся вместе с рабочим органом. Для каждой ко-

ординаты настраивают свою линейку. Логическая последовательность действий, содержание этапов цикла, условия завершения одного этапа и перехода к следующему заносятся в запоминающее устройство.

Программа в запоминающем устройстве имеет циклический характер: по завершении выполнения последней команды (последнего этапа цикла) программа запускается заново. Первой командой программы является команда опроса состояния переключателей, сигнализирующих о готовности оборудования к выполнению очередного цикла. Если оборудование готово (исправно, все узлы находятся на исходных позициях, заготовка установлена и т.д.), то начинается последовательное выполнение команд программы, вызывающих перемещение рабочих органов, переключение режимов работы и т.д.

При перемещении рабочих органов срабатывают конечные переключатели, сигналы об их состоянии поступают в логический блок, который определяет момент завершения выполнения данной команды и переход к следующей. Команды программы содержат код команды (код логической операции) и коды операндов (номера переключателей, состояние которых анализируется командой).

Существует много способов хранения программы. Это может быть штекерная панель со штекерами или панель переключателей, положение которых определяет содержание команд, или устройство последовательного ввода кода очередной команды с перфоленты. Часто применяют устройство для предварительного последовательного ввода команд с клавиш в память на ферромагнитных сердечниках или полупроводниковую память на микросхемах.

В массовом и крупносерийном производстве экономически оправданным является жесткое программирование, когда команды заносятся в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) в виде спаянных электрических схем или микросхем памяти, работающих только на считывание. Устройство управления, логический блок или координатор — это электрическое или электронное устройство, предназначенное для считывания в свой регистр (внутреннюю память) очередной команды программы, расшифровки кода команды, опроса состояния нужных переключателей, выполнения логических операций и выдачи по результатам выполнения операции команд на реле, электромагнитные муфты и другие исполнительные устройства, управляющие работой оборудования.

3.10.3. Микропроцессоры и ЭВМ в системах управления

Первые ЭВМ строились на базе ламп, позже транзисторов, имели небольшое быстродействие и надежность, предназначались главным образом для выполнения сложных вычислений, связан-

ных с проектированием оружия. Основной целью при их проектировании было обеспечение предельного быстродействия пусть даже ценой усложнения конструкции ЭВМ. ЭВМ этого типа существуют и сейчас (большие и суперЭВМ) и используются для автоматизации сложной рутинной работы человека.

Решение сложных задач требует быстродействующего процессора, емкого оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), емких магнитных дисков и т.д., что обусловило огромную стоимость таких ЭВМ.

Для повышения эффективности использования этих ЭВМ формируется очередь программ, подлежащих выполнению. При вынужденной остановке выполнения текущей программы, например на время обращения к устройству печати или магнитному диску, при ожидании ввода с клавиатуры, во избежание простоя дорогостоящей техники автоматически запускается следующая в очереди программа, так что процессор работает непрерывно, и в ЭВМ одновременно выполняется множество программ, запускаемых пользователями с многочисленных терминалов. Исходя из соображений общей эффективности использования ЭВМ, конкретная программа может быть прервана и отложена. При этом время выполнения конкретных программ является непредсказуемым.

Основная черта использования этих ЭВМ — отсутствие прямой связи с внешним миром, когда не требуется мгновенной реакции на внешние обстоятельства (рис. 3.57, *а*).

С появлением в конце 60-х годов XX века микросхем мощность увеличилась, ЭВМ стала надежнее, а стоимость снизилась. Были сделаны попытки создания управляющих ЭВМ (УЭВМ), предназначенных для управления сложными техническими объектами, функционирующими в реальном мире, когда человек является в основном наблюдателем (рис. 3.57, *б*). При изменении условий существования объекта требуется оперативное управление. При возникновении непредвиденных ситуаций необходима значительная мощность ЭВМ для своевременной выработки и выдачи управляющего воздействия на объект управления во избежание аварий.

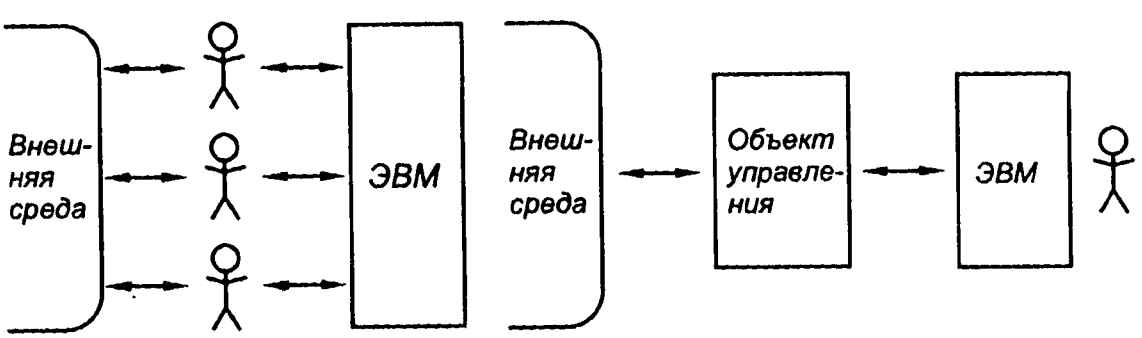


Рис. 3.57. ЭВМ в обработке данных и системе управления

Задержка обработки сигнала от объекта должна быть минимальной, поэтому типичным является выполнение одной управляющей программы, а основным состоянием УЭВМ является ожидание сигналов от объекта или моментов выдачи управляющих воздействий. Во избежание людских и материальных потерь УЭВМ должны иметь высокую надежность. Для повышения надежности и быстродействия системы управления стремятся предельно приблизить УЭВМ к объекту управления.

Задачи управления сравнительно просты. В совокупности эти причины обусловили стремление к упрощению, удешевлению и миниатюризации УЭВМ при росте их числа. Немаловажным является требование гибкости структуры УЭВМ для обеспечения простоты их адаптации к выполнению задач управления конкретными объектами.

Принципы построения первых УЭВМ (миниЭВМ) оказались настолько удачными, что подавляющее большинство современных ЭВМ построены на их основе. На рис. 3.58 приведена структура типичной современной ЭВМ. Основой ЭВМ является магистраль для обмена данными между отдельными устройствами, или модулями ЭВМ (шина, являющаяся совокупностью проводов или дорожек на печатной плате, к которым подключаются блоки ЭВМ). При передаче данных шина занята, и все модули, нуждающиеся в обмене данными, должны ждать ее освобождения, что делает шину узким местом, во многом определяющим быстродействие ЭВМ.

Мозг ЭВМ — центральный процессор (ЦП) — предназначен для обработки данных. Процессор состоит из следующих основных частей:

• операционного устройства, или сумматора, или арифметическо-логического устройства (АЛУ) — автомата по выполнению команд программы типа арифметических команд сложения или умножения двух чисел и логических команд сравнения двух чисел и др.;

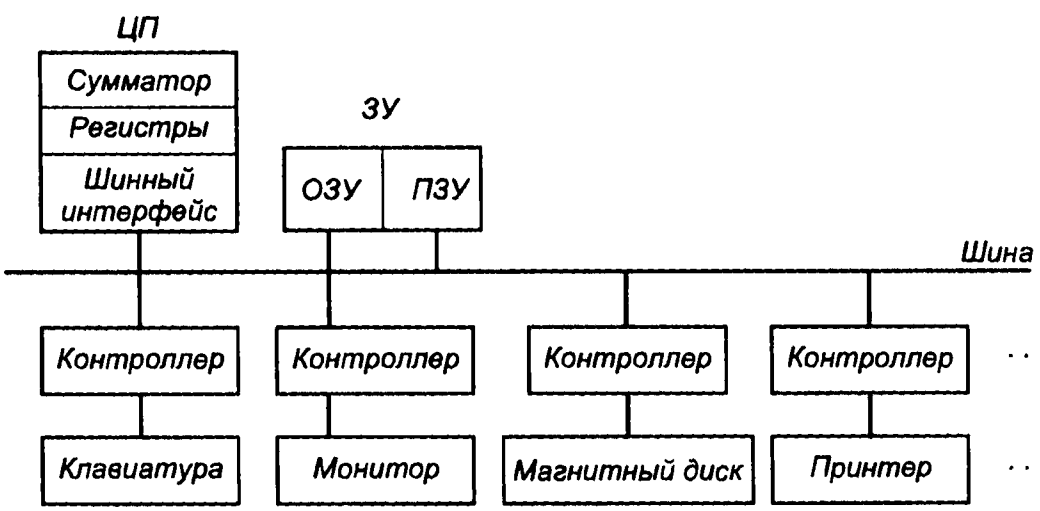


Рис. 3.58. Структура типичной ЭВМ

• регистров и внутренней памяти процессора для промежуточного хранения исходных данных и результатов работы сумматора;

• устройства шинного интерфейса, предназначенного для чтения из памяти по шине команд программы и исходных данных и записи в оперативную память результатов.

Процессор последовательно считывает из памяти команды программы и выполняет их. Последующие команды пользуются результатами выполнения предыдущих команд.

Возможны команды условного перехода, когда выполняется сравнение содержимого ячеек памяти, и в зависимости от результата сравнения осуществляется переход не к следующей по порядку команде, а к команде, хранящейся по адресу, указанному в команде перехода. Команды этого типа позволяют реализовать сложную логику обработки данных. Из технических соображений центральный процессор проектируют так, чтобы он обрабатывал одновременно число бит (двоичных разрядов), равное 2^n.

Важнейшим модулем ЭВМ является *оперативное запоминающее устройство* (ОЗУ), в которое записываются и считываются команды и данные программы по адресам.

Современное полупроводниковое ОЗУ — микросхема, состоящая из большого количества триггеров, каждый из которых способен хранить 1 бит (0 или 1), и механизма адресации для доступа к этим данным по заданному адресу. Обмен с ОЗУ осуществляется обычно байтами, 1 байт = 8 бит — число бит, достаточное для кодирования 256 символов, обычно используемых в текстах (буквы большие и малые, русские и латинские, цифры, знаки). Объем ОЗУ современных ЭВМ исчисляется мегабайтами, или миллионами байтов. Тексты хранятся в ОЗУ в виде последовательностей символов. Под целые числа отводится по 2...4 байта, под дробные числа — по 4...8 байтов. При выключении ЭВМ микросхема ОЗУ обесточивается, и вся информация, записанная в ОЗУ, теряется.

Наряду с оперативным в ЭВМ имеется и *постоянное запоминающее устройство* (ПЗУ), работающее только на чтение. Информация в ПЗУ записывается с использованием сложного оборудования в заводских условиях, изменить или стереть ее сложно, при выключении питания данные сохраняются. ПЗУ используется для хранения неизменных данных, например элементов программного обеспечения, ответственных за управление внешними устройствами типа клавиатуры, дисплея, магнитного диска (так называемых драйверов внешних устройств).

Адреса ОЗУ и ПЗУ составляют единое адресное пространство, и обращение к ним происходит с использованием общих команд. Соотношение размеров ОЗУ и ПЗУ определяется назначением ЭВМ. Например, в ЭВМ общего назначения память состоит в основном из ОЗУ, чем обеспечивается гибкость и универсальность

ЭВМ. В УЧПУ станка доля ПЗУ, хранящего неизменные программы управления узлами станка, как правило, значительно больше.

Шину, процессор и ЗУ иногда называют центром ЭВМ, так как именно они составляют базу, на которой строится ЭВМ и которая определяет ее возможности. Остальные модули, такие как дисплей, накопитель на магнитном диске, принтер, соединяются с шиной при помощи контроллеров — блоков сопряжения.

Для подключения к ЭВМ любого из многообразных внешних устройств, выпускаемых промышленностью или изготавливаемых для системы управления индивидуально, достаточно изготовить контроллер — несложный блок преобразования данных и команд из стандарта, принятого для обмена по шине ЭВМ, в формат данного устройства. Часто контроллер выполняет функцию управления сложным внешним устройством типа мощного принтера, диска или дисплея и в этом случае представляет собой специализированную микроЭВМ со своими процессором, ОЗУ и ПЗУ.

Использование шин в ЭВМ обеспечивает гибкость структуры и позволяет компоновать ее из необходимых для конкретного применения модулей.

Важнейшим из внешних устройств является накопитель на магнитном диске, предназначенный для хранения больших объемов информации (программ и данных). Стоимость хранения единицы информации на диске значительно ниже, чем в ЗУ, и при выключении ЭВМ информация на диске сохраняется. Емкость дисков исчисляется гигабайтами (миллиардами байтов).

Переход к использованию больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных микросхем привел к снижению стоимости и габаритов, повышению мощности и надежности современных ЭВМ. Современный микропроцессор состоит из многих миллионов транзисторов, имеет площадь порядка нескольких квадратных сантиметров и способен выполнять несколько сотен миллионов операций в секунду.

ЭВМ создают обычно на базе одного из микропроцессорных наборов, состоящих из согласованных между собой микросхем: микропроцессора, ОЗУ, ПЗУ, контроллера, шины, АЦП и ЦАП и т.д. Постепенно сформировался стандарт на основные модули микроЭВМ, что привело к их унификации, повышению качества и снижению стоимости как самих микросхем, так и программного обеспечения ЭВМ.

Производство дешевых и мощных одноплатных микроЭВМ, оснащенных магнитным диском и емкой памятью и помещенных в герметичный металлический корпус, сделало их незаменимым элементом систем управления. Объединенные в сети, такие микроЭВМ составляют костяк систем управления современным производством.

При проектировании системы управления встает вопрос, какую ЭВМ использовать: специализированную или общего назна-

чения. Специализированные ЭВМ, ориентированные на решение задач узкого класса, обеспечивают требуемую надежность, быстродействие, функциональные возможности, габариты, устойчивость к условиям эксплуатации. Однако их использование экономически оправдано только при широких масштабах применения системы управления, например в качестве УЧПУ станков, так как решение других задач на этой ЭВМ невозможно или неэффективно, а индивидуальная разработка и изготовление специализированных ЭВМ и программного обеспечения к ним дороги. Использование ЭВМ общего назначения для управления, с одной стороны, выгодно, так как они выпускаются крупными сериями и дешевы, имеется много специалистов по их использованию, сама ЭВМ может применяться для решения широкого круга задач; кроме того, возможно недорогое обновление системы ввиду совместимости новых моделей ЭВМ со старыми. При этом для включения ЭВМ в систему управления требуется разработка контроллера и драйвера к нему, что для типовых ЭВМ не составляет труда. Однако, с другой стороны, обычные ЭВМ часто недостаточно быстродействующи, надежны и устойчивы к окружающей среде.

В связи с удешевлением массовой электроники и ростом ее возможностей наблюдается тенденция максимального использования готовых компонентов вплоть до ЭВМ, выпускаемых в этом случае в специальном исполнении (герметичный кожух, малые габариты, специальное конструктивное оформление).

3.10.4. Устройства сопряжения ЭВМ с объектом управления

Для ввода непрерывных сигналов от датчиков в регулятор, построенный на базе ЭВМ, и для передачи цифрового управляющего воздействия на привод системы управления, требующий обычно сигнала в аналоговой форме, используются аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи. В специализированных ЭВМ АЦП и ЦАП располагают непосредственно в ЭВМ.

ЭВМ общего назначения должна быть оснащена дополнительным внешним *устройством связи с объектом* (УСО), предназначенным для сбора сигналов от датчиков и преобразования их в цифровую форму, а также для преобразования управляющих воздействий в аналоговую форму. Дополнительно в функции УСО может входить коррекция нелинейности характеристик датчиков, устранение систематических погрешностей и первичная обработка данных. В этом случае главной функцией ЭВМ является запись данных от УСО на магнитный диск и обслуживание дисплея.

Различают пассивные УСО, работающие под контролем центральной ЭВМ, простые, дешевые, но сравнительно медленные, так как их быстродействие ограничивается быстродействием са-

мой ЭВМ, и активные УСО, построенные на базе отдельной микроЭВМ, практически не требующие ресурса центральной вычислительной машины, в которую они входят, по быстродействию часто ее превосходящие и пригодные для сложной обработки данных. Иногда обработка данных в УСО настолько сложна, что УСО представляет собой специализированную ЭВМ, по сложности превосходящую ЭВМ, для которой применяется данное УСО.

Алгоритм работы активных УСО определяется программами, загружаемыми в УСО из ЭВМ, что повышает гибкость УСО. Передача слабых сигналов от датчиков по длинным линиям связи к ЭВМ нежелательна в связи с искажающим действием помех, поэтому часто используют удаленное (от центральной ЭВМ) УСО, предельно приближенное к датчикам и соединенное с центральной ЭВМ, сетью или цифровой линией связи, значительно превосходящей по помехоустойчивости аналоговые линии связи с датчиками. Удаленное УСО — обязательно активное, так как для обслуживания цифровой линии передачи требуется микропроцессор.

Обычно УСО способны обрабатывать следующие виды входных сигналов:

аналоговый, при этом измеряемая величина кодируется уровнем напряжения с датчика. Сигнал подвержен влиянию помехи, меняющей уровень напряжения, поэтому чем короче линия связи между датчиком и УСО, тем меньше влияние помехи и точнее данные. Сигнал в УСО проходит через АЦП для преобразования в цифровую форму;

импульсный последовательный, в этом случае измеряемая величина кодируется серией импульсов постоянного уровня (обычно 5,12 В), например сигнал от фотодатчика перемещения. Электромагнитные помехи незначительно изменяют амплитуду импульсов, не изменяя их числа, поэтому помехоустойчивость такого сигнала выше и линии связи могут быть длиннее. Сигнал не пропускается через АЦП;

импульсный параллельный, измеряемая величина которого кодируется набором импульсов (8...12 шт.) напряжением около 5 В, поступающим параллельно одновременно, например, с цифрового вольтметра. Сигнал помехоустойчив, не требует преобразования в цифровую форму;

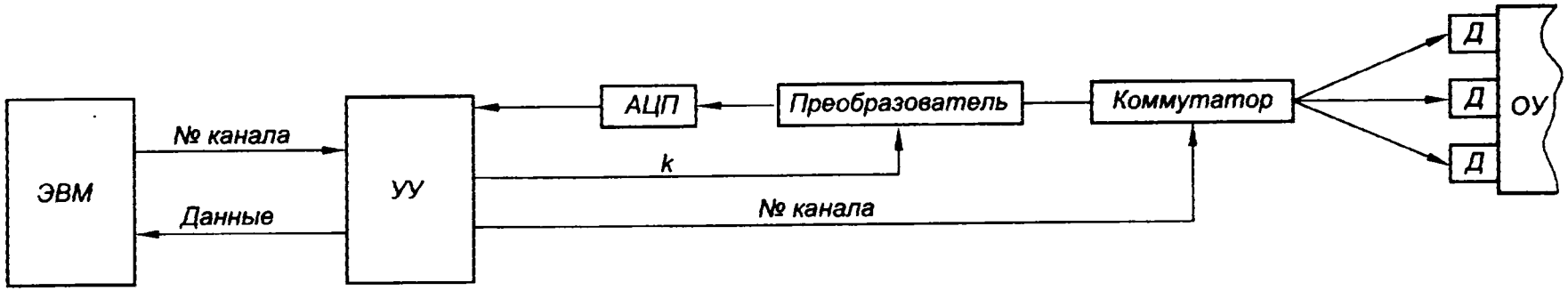
инициативный импульсный сигнал, например аварийный сигнал от конечного выключателя.

Виды выходных сигналов УСО:

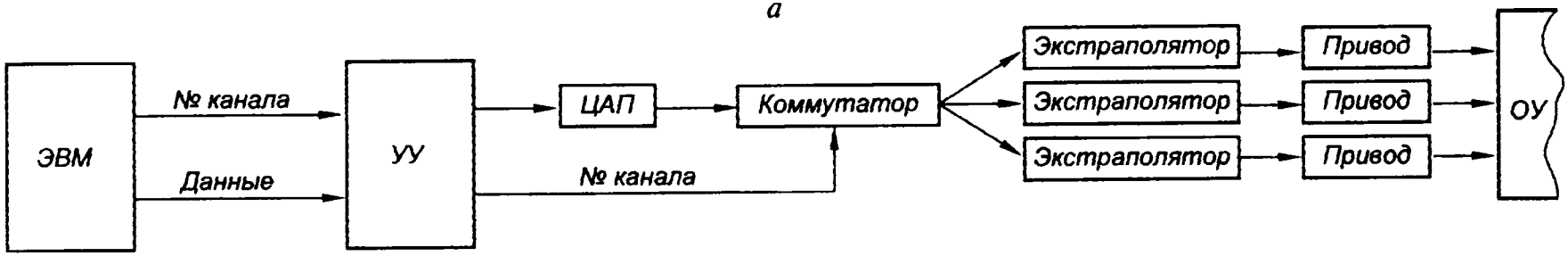
дискретный импульсный последовательный сигнал, например импульсы, подаваемые на шаговый двигатель или реле;

аналоговый сигнал, например, поступающий на вход усилителя для управления электродвигателем.

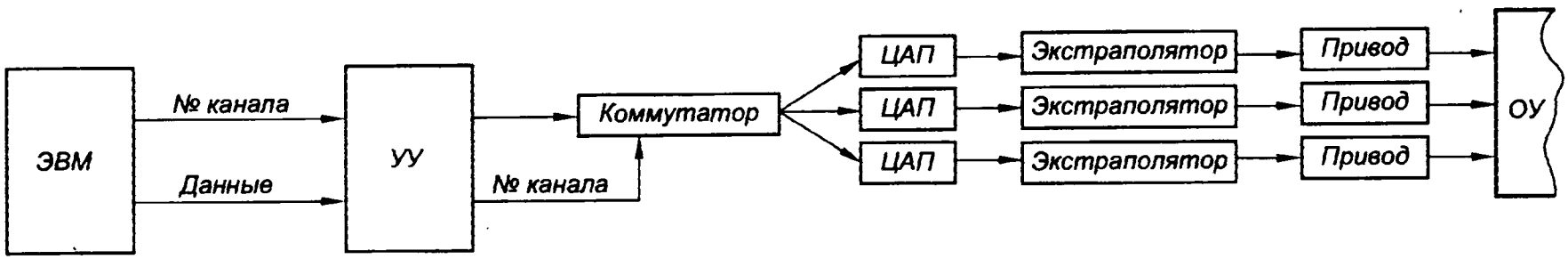
Подсистема аналогового ввода УСО предназначена для дискретизации входных аналоговых сигналов по времени и уровню,



а



б



в

Рис. 3.59. Аналоговые подсистемы ввода (*а*) и вывода (*б*, *в*) устройства связи с объектом

а также кодирования результатов обычно целым числом. Подсистема включает в себя (рис. 3.59, *а*):

• устройство управления, которое получает из ЭВМ номер опрашиваемого канала (номер датчика), выдает на коммутатор номер канала, а на преобразователь — коэффициент усиления для масштабирования сигнала, принимает от АЦП цифровой код замера и передает код в ЭВМ;

• коммутатор (мультиплексор или переключатель), выполняемый обычно на быстродействующих полупроводниковых ключах (время переключения, включая время стабилизации выходного сигнала, составляет 1...3 мкс) и соединяющий заданный датчик с преобразователем;

• преобразователь, приводящий сигналы от разных датчиков *Д* к стандартному интервалу входных напряжений АЦП для уменьшения погрешности АЦП;

• специальный АЦП, преобразующий аналоговый сигнал в цифровой код, поступающий на объект управления *ОУ*.

Подсистема аналогового вывода предназначена для преобразования серии чисел X_i, поступающих из ЭВМ на УСО, в непрерывный аналоговый сигнал $X(t)$ путем экстраполяции уровня выходного сигнала по времени до прихода следующего входного числа X_{i+1}. Подсистема (рис. 3.59, *б*) состоит:

• из устройства управления, принимающего от ЭВМ номер выходного канала и код уровня сигнала, передающего код на ЦАП и номер выходного канала на коммутатор;

• экстраполяторов, прогнозирующих по истории сигнала X_{i-2}, X_{i-1}, X_i его изменение для времени после прихода последнего кода X_i (часто вместо прогноза интерполятор поддерживает на выходе постоянное напряжение, соответствующее последнему коду X_i, при этом на каждый выходной канал нужен свой экстраполятор.

Часто используют пары ЦАП—экстраполятор (рис. 3.59, *в*).

Встроенные УСО подключаются через контроллер непосредственно к шине ЭВМ, чем обеспечивается высокая скорость передачи данных между УСО и ЭВМ (порядка 5 Мбайт/с). Удаленные УСО подключаются к ЭВМ через цифровую линию связи и так называемый последовательный интерфейс ЭВМ, когда биты передаются последовательно по 3- или 4-жильному кабелю (1 или 2 жилы используются для управления передачей) со скоростью порядка 1...2 Кбайт/с на расстояние до 15 м.

3.11. Программное обеспечение систем управления

Программное обеспечение (ПО) наряду с аппаратным обеспечением (процессором, памятью, внешними устройствами) является вторым важнейшим компонентом ЭВМ. Можно сказать, что

основные возможности ЭВМ, ее интеллект, отличающий ее от других электронных устройств, реализованы именно в ПО.

В настоящее время затраты на создание ПО в несколько раз превышают соответствующие затраты на аппаратную часть ЭВМ. При использовании в системах управления ЭВМ гибкость и эффективность системы и качество управления не в последнюю очередь зависят от программ, которые выполняет ЭВМ.

3.11.1. Математическое обеспечение ЭВМ

Программы, используемые в системах управления, создаются на основе предварительного теоретического анализа системы управления, ее математического моделирования, во время которого проверяются технические решения и определяются параметры системы, обеспечивающие оптимальное управление данным объектом. Математический анализ позволяет синтезировать оптимальный алгоритм управления, рассчитать реакцию системы на возможные отклонения в условиях функционирования объекта и на изменения в узлах системы управления.

ПО — это воплощение, реализация математического обеспечения. При проектировании системы управления немалая доля затрат приходится на математический анализ системы вследствие сложности и невозможности интуитивно предсказать ее поведение. Математический аппарат анализа систем управления относится к наиболее сложным разделам современной математики.

Несмотря на широкое использование ЭВМ при проектировании, синтез системы остается во многом трудно формализуемым творческим актом высококвалифицированного специалиста, не поддающимся автоматизации (в отличие от программирования). Поэтому до сих пор часто употребляют термин «математическое обеспечение» вместо термина «программное обеспечение», особенно среди разработчиков систем, в том числе систем управления, подчеркивая тем самым важность математической основы любой программы.

3.11.2. Алгоритмы

По результатам математической проработки задачи формируется алгоритм программы — конечная последовательность однозначных правил, исполнение которых позволяет с помощью конечного числа шагов получить решение задачи из некоторого класса однотипных задач, однозначно определяемое исходными данными. Подразумевается, что исходные данные могут изменяться в определенных пределах и процесс применения правил к исходным данным (путь решения задачи) определен вполне однозначно; на каждом шаге процесса применения правил известно, что нужно считать результатом этого процесса.

При создании алгоритма программы по результатам математического анализа задачи обычно проводят оптимизацию для учета дополнительных условий, важнейшими из которых являются следующие:

технические характеристики ЭВМ (объем ОЗУ, магнитного диска, производительность процессора и т.д.);

имеющиеся в наличии инструменты программирования (трансляторы или интерпретаторы языков программирования, библиотеки стандартных подпрограмм, текстовые редакторы, отладчики, оболочки и т.д.);

степень универсальности программы и соответствующие требования к надежности и модифицируемости программы и форме диалога с ней.

Эти правила противоречивы, и поиск разумного компромисса требует разносторонней квалификации специалиста (в крупных учреждениях, занимающихся созданием программ, предусмотрен целый штат алгоритмистов). Разработан свод правил, облегчающих построение эффективных алгоритмов. Например, алгоритм должен по возможности решать именно поставленную задачу, а не серию отдельных задач. Использование циклических, итерационных процедур позволяет сократить размер программы, сделать ее понятнее при программировании и надежнее при эксплуатации. Максимально используются готовые отлаженные и проверенные блоки и подпрограммы.

Именно при составлении алгоритма следует предусмотреть проверки на соответствие исходных данных и результатов различным ограничениям. Например, при вычислениях делитель не должен быть близок к нулю, детерминант не должен быть меньше нуля; при программировании операции точения для станка-автомата программа должна проверить наличие и закрепленность заготовки, установить суппорт в исходное положение; при создании протокола обмена между управляющей ЭВМ и программируемым контроллером следует разработать удобный и компактный набор условных кодов, подлежащих передаче по линии связи, и т.д.

Понятие алгоритма было сформировано и широко применяется в математике для описания последовательности действий при решении задач; оно было заимствовано специалистами в области программирования. Алгоритм есть пусть не точная, но понятная программисту форма постановки задачи, наглядно иллюстрирующая исходные данные программы, логику решения задачи и требуемые результаты. В алгоритме обычно опускаются несущественные или очевидные детали, прорабатываемые на следующем этапе во время программирования по алгоритму.

Степень детализации алгоритма определяется уровнем квалификации потребителя алгоритма. Например, требуется создать про-

грамму вычисления среднего арифметического по результатам замеров. Возможны различные формы представления алгоритма расчета.

Это, например, могут быть формулы для вычисления среднего:

$$\bar{X} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i.$$

Однако эта форма предполагает обычно высокую квалификацию потребителя алгоритма и применяется в основном в специальной литературе.

Для повышения наглядности часто используют блок-схему алгоритма (рис. 3.60). При усложнении алгоритма блок-схемы теряют наглядность, поэтому их применяют главным образом для изображения укрупненного алгоритма, которое отражает его логику.

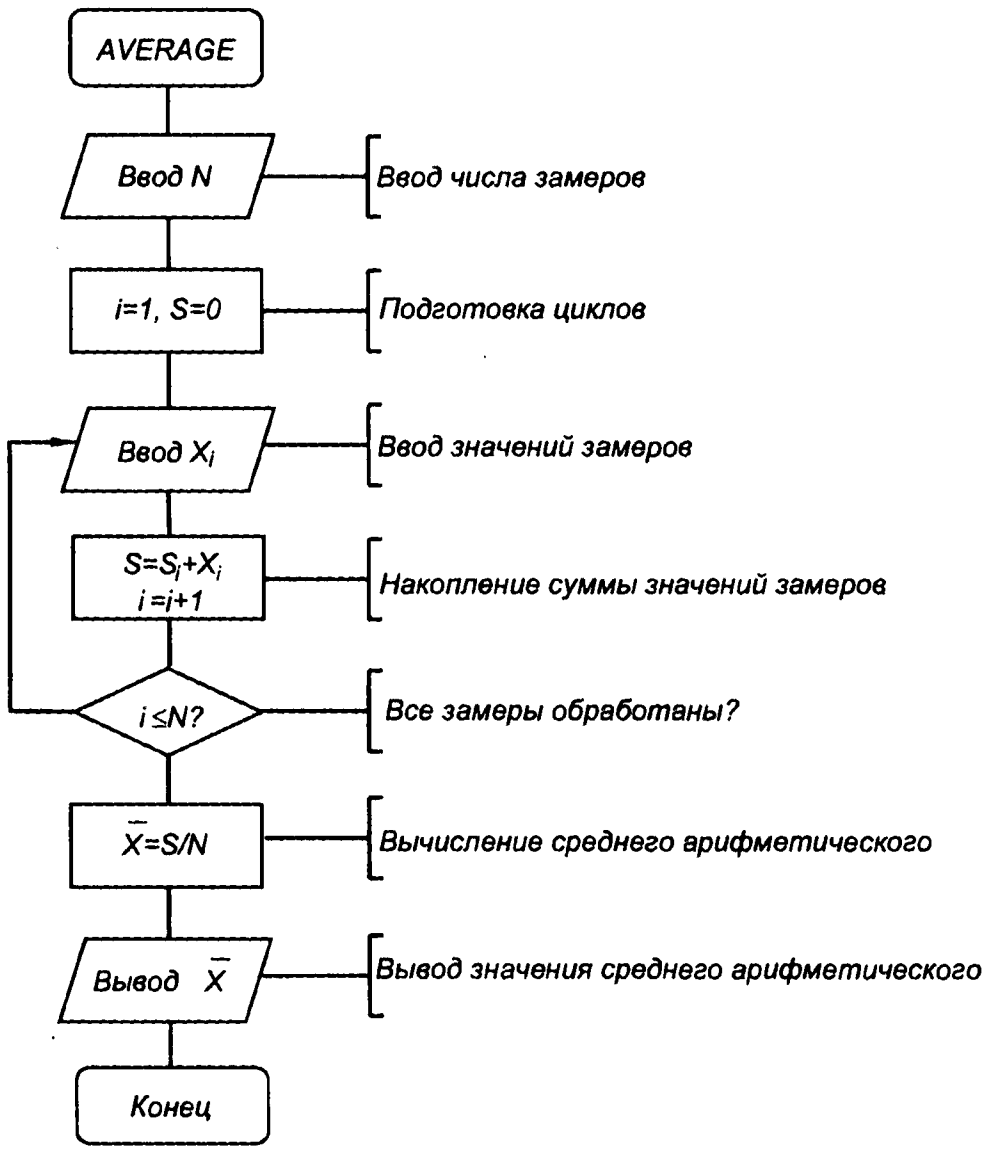


Рис. 3.60. Блок-схема алгоритма вычисления среднего значения

Алгоритм может быть представлен также в виде схемы действий, заданной в словесной форме, например, для той же задачи вычисления среднего он будет выглядеть следующим образом:

1. Ввод числа замеров N.
2. Подготовка цикла вычисления суммы результатов замеров:
   счетчик цикла $i = 1$;
   начальное значение сумматора $S = 0$.
3. Ввод по очереди значений замеров и вычисление их суммы:
$$S = S + X_i;$$
$$i = i + 1.$$
4. Проверка правила завершения цикла:
   если $i \le N$, то идти к п. 3.
5. Вычисление среднего арифметического:
$$\bar{X} = \frac{S}{N}.$$
6. Вывод значения среднего арифметического.

3.11.3. Операционная система

Для упрощения процесса создания программного обеспечения программу пишут не в командах, которые способен выполнить центральный процессор (ЦП), а на языке программирования, более понятном человеку. Чтобы такая программа могла быть выполнена, в памяти ЭВМ должен находиться интерпретатор команд языка, на котором написана программа, обеспечивающий общение программы с электронными компонентами ЭВМ.

Операционная система (ОС) — комплекс взаимосвязанных управляющих и обслуживающих программных средств, обеспечивающих автоматическое управление ресурсами ЭВМ при выполнении задач. Под задачей будем понимать последовательность двоичных кодов инструкций ЦП и системных вызовов-запросов со стороны задачи к ОС на обмен с внешними устройствами (ВУ).

Операционная система, с одной стороны, управляет микросхемами, контроллерами и т.д., с другой — обеспечивает выполнение задач и является промежуточным звеном между программным обеспечением (ПО) и непосредственным исполнителем — техническими средствами. На рис. 3.61 приведена структура типичной ОС.

Основой ОС является ядро, обеспечивающее:

- распределение ОЗУ под одну или несколько задач;
- распределение времени ЦП между этими задачами;
- обеспечение обмена сообщениями между задачами;
- выполнение системных вызовов от задач на обмен с ВУ;

Ядро содержит *файловую систему* — единый механизм обмена данными со всеми внешними устройствами, когда любое устрой-

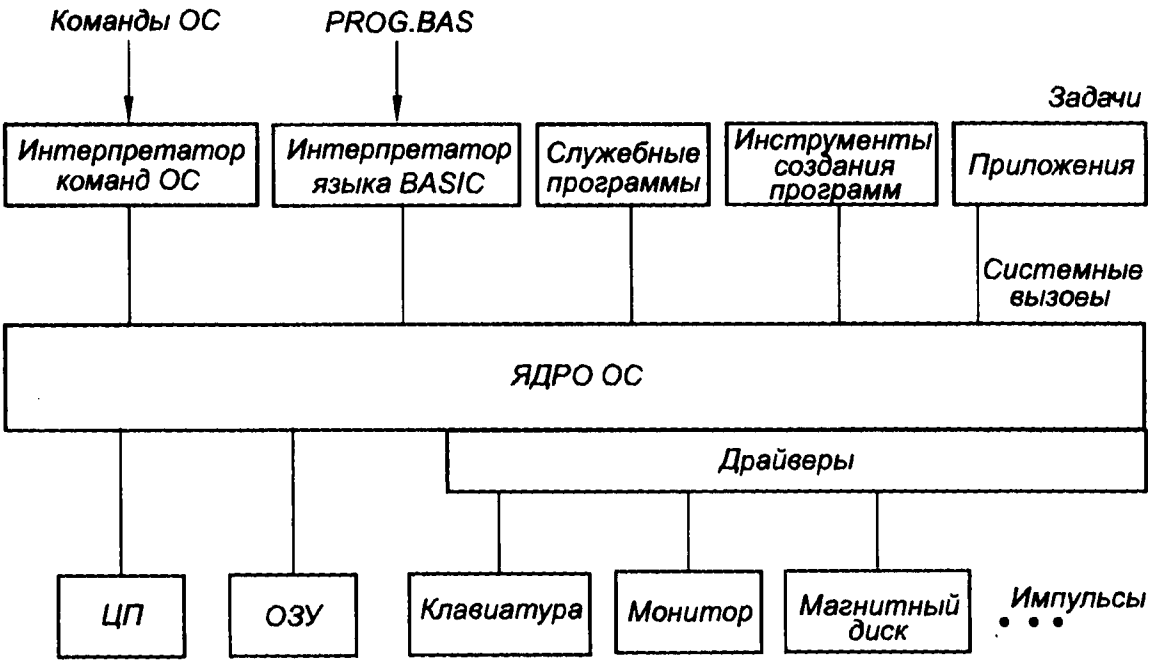


Рис. 3.61. Типовая структура операционной системы (ОС)

ство рассматривается как хранилище одного или нескольких файлов (*файл* — это совокупность байтов, имеющая свое имя).

Для обеспечения связи универсального ядра с конкретными ВУ ядро дополняется *драйверами*, выполняющими функцию посредников между ядром файловой системы и ВУ. Драйверы — это стандартные программы ввода-вывода, которые учитывают детали конструкции контроллера и ВУ и позволяют сделать само ядро компактным и независимым от конструкции ВУ.

В состав ОС входит *интерпретатор команд* — задача, принимающая с дисплея команды управления ОС на удобном человеку языке, переводящая их в форму, понятную ядру, и передающая их ядру.

Кроме того, в состав ОС, как правило, входят инструменты для создания, компиляции или интерпретации прикладных программ на языках высокого уровня и средства обслуживания самой ОС и аппаратной части ЭВМ.

Перечисленные выше элементы относятся к системному ПО, так как выполняют функции обслуживания системы. Программы, связанные непосредственно с использованием ЭВМ в практических целях, в частности с управлением, составляют прикладное ПО.

3.11.4. Программы

Создание задач требует программирования операций обработки данных в двоичных кодах инструкций ЦП, для обеспечения обмена с внешними устройствами требуется правильное оформление системных вызовов к ядру ОС. Это является чрезвычайно

трудоемкой и квалифицированной работой. Требование сокращения затрат на программирование обусловило создание инструментов, позволяющих программировать на языках высокого уровня, перерабатывать исходную программу в задачу, пригодную для данной ОС, и выполнять задачу в ОС.

Существует два основных подхода к решению этой проблемы. Первым из них является создание и запуск задачи-интерпретатора. Интерпретатор принимает из исходной программы по одному оператору языка высокого уровня, расшифровывает содержание оператора и запускает один из своих модулей, ответственный за выполнение этого оператора. При выполнении операторов интерпретатор общается с ОС: выдает системные вызовы, получает ответы на них, реагирует на сигналы от ОС.

Программа для интерпретатора с языка BASIC, составленная по рассмотренному выше алгоритму, имеет следующий вид:

```
10 PRINT "Введите число замеров";
20 INPUT N%
30 I%=1
40 S=0
50 PRINT "Введите замер", I%;
60 INPUT X
70 S=S+X
80 I%=I%+1
90 IF I%<=N% THEN GOTO 50
100 S=S/N%
110 PRINT "Среднее арифметическое"; S
120 END
```

Для повышения наглядности текста программы применяют комментарии, сопровождающие операторы языка программирования, а сами операторы располагают структурированно, с отступами:

```
1  REM Программа вычисления среднего арифметического
AVERAGE.BAS
2  REM При работе требуется ввести с клавиатуры:
3  REM а) число замеров N%,
4  REM б) по очереди значения замеров X.
5  REM Среднее арифметическое вычисляется по формуле
6  REM X'= (X1+X2+...+XN)/N
7  REM Результат выдается на экран.
10 PRINT "Введите число замеров";
20 INPUT N%
25 REM Подготовка цикла ввода и накопления значений замеров
26 REM I% — счетчик цикла,
27 REM S — сумматор
30 I%=1
```

```
40 S=0
45 REM  Цикл ввода и накопления значений замеров
50 PRINT "Введите замер", I%;
60 INPUT X
70 S=S+X
80 I%=I%+1
90 IF I%<=N% THEN GOTO 50              :REM Проверка
правила завершения цикла
100 S=S/N%                             :REM Вычисление
среднего арифметического
110 PRINT "Среднее арифметическое"; S  :REM Вывод
результата на экран
120 END
```

Тексты программ, оформленные таким образом, не нуждаются в дополнительном описании и блок-схемах, понятны не только автору, но и его коллегам, что уменьшает число ошибок, повышает производительность и качество программирования и снижает стоимость программ. Комментарии не учитываются при выполнении программы и не влияют на скорость обработки данных.

Особенностью интерпретаторов является независимое выполнение отдельных операторов. При выполнении приведенной программы интерпретатор N раз расшифрует операторы ввода X и сложения чисел и выполнит их, причем основная часть времени уйдет на многократную расшифровку одних и тех же операторов.

Интерпретаторы широко используются ввиду простоты их создания и малой требовательности к ресурсам ЭВМ. Так, первые микроЭВМ вместо громоздкой ОС имели только встроенный в ПЗУ интерпретатор с языка BASIC, вполне удовлетворявший нужды обычного пользователя. Работа УЧПУ также базируется на последовательной интерпретации команд управляющей программы.

Не будет преувеличением утверждать, что основой управления на базе микропроцессоров является именно интерпретация программ.

Для решения сложных задач обработки данных, требующих много времени работы ЦП, интерпретация неприемлема. Программу на языке высокого уровня типа FORTRAN или C подвергают предварительной переработке — трансляции или компиляции, во время которой выполняется анализ программы как единого целого, производится ее эквивалентное преобразование с целью сокращения повторов, оптимизации последовательности выполнения операций и т.д., после чего программа переводится в коды команд процессора. Результатом трансляции является задача, общающаяся с ОС без посредников, например расчетная задача, или интерпретатор BASIC, или интерпретатор команд ОС.

После перевода алгоритма в операторы языка программирования начинается наиболее трудоемкий этап создания программы —

ее отладка. Ошибки, допущенные в операторах, могут быть грубыми, нарушающими правила написания операторов (такие ошибки находит интерпретатор или транслятор и указывает на них программисту). Значительно сложнее найти и исправить ошибки, связанные с логикой работы программы, так как здесь требуется творческое участие самого программиста. Кроме того, сами трансляторы и интерпретаторы, являющиеся также программами, содержат недоработки, документация к ним, как правило, неполная.

Поэтому наиболее ответственным этапом создания программ является их тестирование, во время которого программа испытывается на наиболее «неудобных» исходных данных или в наиболее «неудобных» условиях для выявления скрытых ошибок и дефектов (а не для демонстрации работоспособности программы, как принято считать). Завершающим этапом является создание инструкций и другой документации для пользователей программы.

Качество документации во многом определяет эффективность использования программы. Так как пользователями программ являются, как правило, люди, далекие от программирования, все большее значение принимает простой, понятный сценарий общения с программой — интерфейс пользователя. Так, на экран системы управления должен выдаваться лишь необходимый минимум сообщений, ввод команд оператора по возможности должен осуществляться путем выбора пунктов меню, а не вводом текста с клавиатуры. Дополнительные возможности предоставляют цвет и звук, но чрезмерное их использование утомляет оператора и может привести к авариям.

3.11.5. Программируемые логические контроллеры

Применение с конца 60-х годов XX века миниЭВМ, а потом микроЭВМ в качестве логического блока систем циклового управления привело к созданию систем на базе *программируемых логических контроллеров* (ПЛК — цифровых электронных устройств автоматизации (ЭВМ), в которые входят:

- блок связи с технологическим оборудованием (УСО);
- память для хранения программ, реализующих функции управления технологическим оборудованием;
- процессор для выполнения команд программ;
- устройство ввода программ в память.

Современные программируемые логические контроллеры (логические микроконтроллеры — ломиконты, регулирующие микроконтроллеры — ремиконты) строятся на базе микропроцессоров и представляют собой специализированную микроЭВМ, у которой основными внешними устройствами ввода данных яв-

ляются конечные выключатели и датчики состояния оборудования, а основными внешними устройствами вывода данных — реле и муфты.

В постоянной памяти (ПЗУ) хранится системная программа-монитор (упрощенный вариант ОС), предназначенная для приема с одного из внешних устройств (клавиатуры, магнитного диска, сети) управляющей программы и обслуживания обмена данными с такими устройствами ввода, как датчики, выключатели и т.д., и такими устройствами вывода, как экран дисплея, сигнализирующие табло, усилители, реле, муфты. Кроме того, в ПЗУ может быть прошита исполняющая программа — интерпретатор команд управляющей программы на одном из языков программирования логических контроллеров. Эти компоненты программного обеспечения контроллера стабильны, неизменны по времени, поэтому разумно сделать их неотъемлемым дополнением электронной части контроллера.

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) используется для временного запоминания управляющей программы и данных, нужных для ее работы, сохранения данных от датчиков и выключателей, ведения протокола работы системы.

Контроллер снабжен мощным модулем устройства ввода-вывода (УСО), позволяющим обмениваться данными в стандартизованной форме с десятками датчиков и исполнительных устройств. Программируемый контроллер имеет свои часы (таймер), позволяющие выполнять управление не только по сигналам от датчиков типа выключателей, но и по времени. Вычислительная мощь современных микропроцессоров делает возможным создание микроконтроллеров с функцией ПИД-регулятора и выполнять сложное управление с обратными связями.

Широкое распространение программируемых логических контроллеров привело к их унификации и стандартизации средств программирования (международный стандарт IEC 1131).

Рассмотрим их на примере следующей задачи. Пусть условием срабатывания реле Q является срабатывание реле A или C или несрабатывание реле B, причем одновременно по цепи обмотки реле D должен течь ток, а реле E должно быть обесточено.

При программировании контроллеров в настоящее время используют несколько языков программирования:

- графические языки для данного примера в обозначениях логических элементов приведены на рис. 3.62, *а*, в обозначениях релейно-контактных схем — на рис. 3.62, *б*, на рис. 3.62, *в* показан вид схемы при программировании ПЛК на ЭВМ;
- языки, подобные языкам программирования обычных ЭВМ:

для программирования быстрых фрагментов используется язык низкого уровня типа ASSEMBLER, на котором программа для рассматриваемого примера имеет следующий вид:

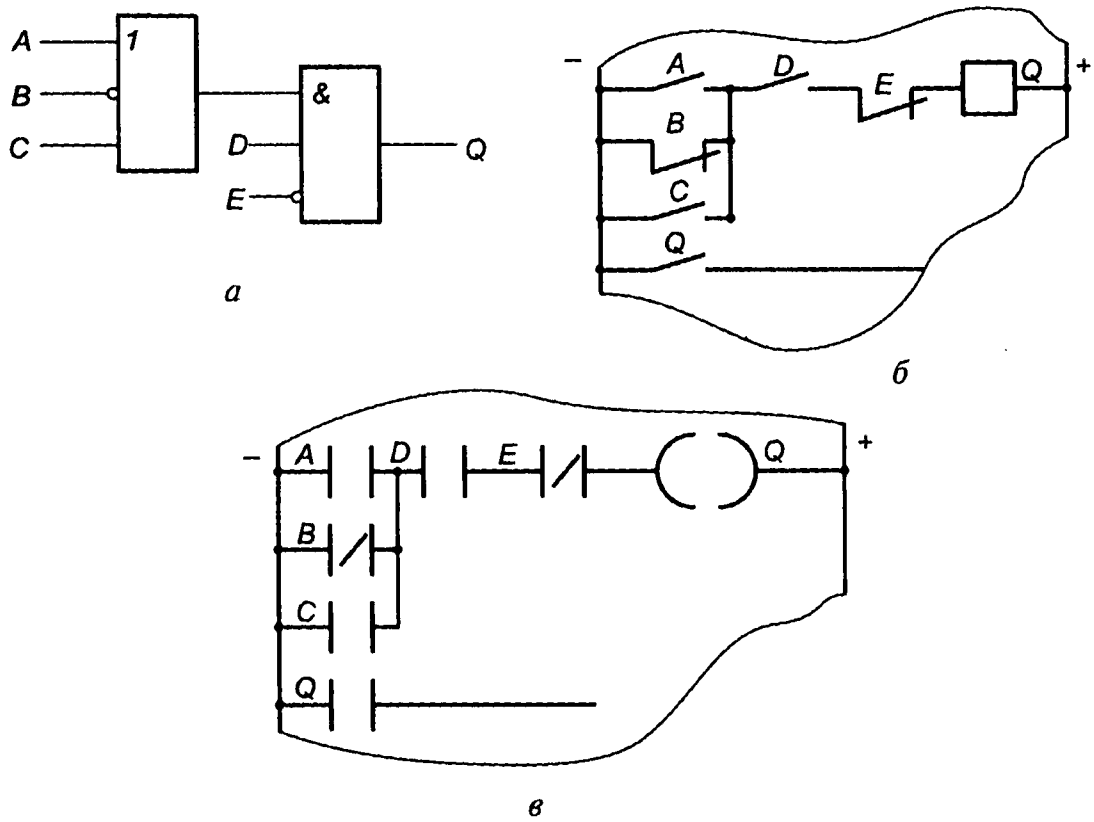


Рис. 3.62. Программирование логических контроллеров

LD A	загрузить в сумматор состояние переключателя *A*
ORN B	добавить по ИЛИ значение НЕ-*B*
OR C	добавить по ИЛИ значение *C*
AND D	добавить по И значение *D*
ANDN E	добавить по И значение НЕ-*E*;

для программирования сложных алгоритмов управления используется язык высокого уровня типа PASCAL, программа на котором выглядит так:

Q := (A OR NOT B OR C) AND D AND NOT E.

Алгоритмические языки позволяют создавать сложные программы, включающие в себя условные и безусловные переходы, циклы и даже возможность распараллеливания программы на две ветви, каждая из которых выполняется независимо, и в точке слияния ветвей предусмотрен механизм синхронизации — опередившая ветвь ждет отставшую (если время ожидания превышает допустимое, программа завершается аварийно).

Как правило, сами контроллеры в целях снижения стоимости не имеют аппаратных и программных средств создания и отладки управляющих программ. Это делается на специальных интеллектуальных контроллерах (кросс-системах) — мощных ЭВМ, оснащенных большой памятью и соответствующим программным обеспечением, моделирующих работу контроллера, обмен с дат-

чиками и исполнительными устройствами и т.д. Вспомогательное программное обеспечение позволяет быстро находить ошибки в программе, детально исследовать ее работу и провести качественное тестирование. После этого управляющая программа переводится в язык команд конкретного контроллера и может быть в него загружена и выполнена.

Системы управления на основе программируемых контроллеров обладают высокой гибкостью и мобильностью, переход к обработке другой детали сводится к переустановке путевых упоров и копиров и вводу в память новой программы.

Использование программируемого контроллера значительно проще и дешевле, чем монтаж панели с реле. В состав ПО контроллера можно включить программы-тесты для автоматического контроля и диагностики неисправностей оборудования.

Контроллер по габаритным размерам значительно меньше стандартного релейного устройства управления. Контроллеры на интегральных микросхемах потребляют мало электроэнергии и выделяют мало тепла, поэтому их помещают в герметичный металлический корпус, защищающий от вредного воздействия среды и экранирующий от электромагнитных помех.

Если требуется обеспечить сложное управление многими устройствами, то вместо ПЛК используют ЭВМ с УСО и многозадачной ОС, в которой параллельно выполняется несколько задач, ответственных за отдельные участки оборудования.

Если не предполагается смена управляющей программы, то она помещается в ПЗУ вместе с интерпретатором (например, в бытовой технике: печах СВЧ, стиральных машинах и т.д.).

Так как современный программируемый логический контроллер представляет собой мощную специализированную ЭВМ, соединенную по сети с другими средствами цифровой и вычислительной техники, он является идеальным средством автоматизации в условиях перехода к гибким производственным системам.

3.11.6. Системы числового программного управления

Числовым программным управлением металлорежущими станками называют управление рабочими органами станка при обработке заготовки по управляющей программе, являющейся последовательностью команд в алфавитно-цифровом коде (в символьной форме) на специальном языке. Принципиальное отличие систем ЧПУ от ранее рассмотренных систем управления заключается в способе расчета последовательности управляющих сигналов и передачи их рабочим органам станка.

На чертеже технологическая информация представлена в виде графических изображений (контур), чисел (размеры), условных знаков (шероховатость), текста и т.д. В ранее рассмотренных систе-

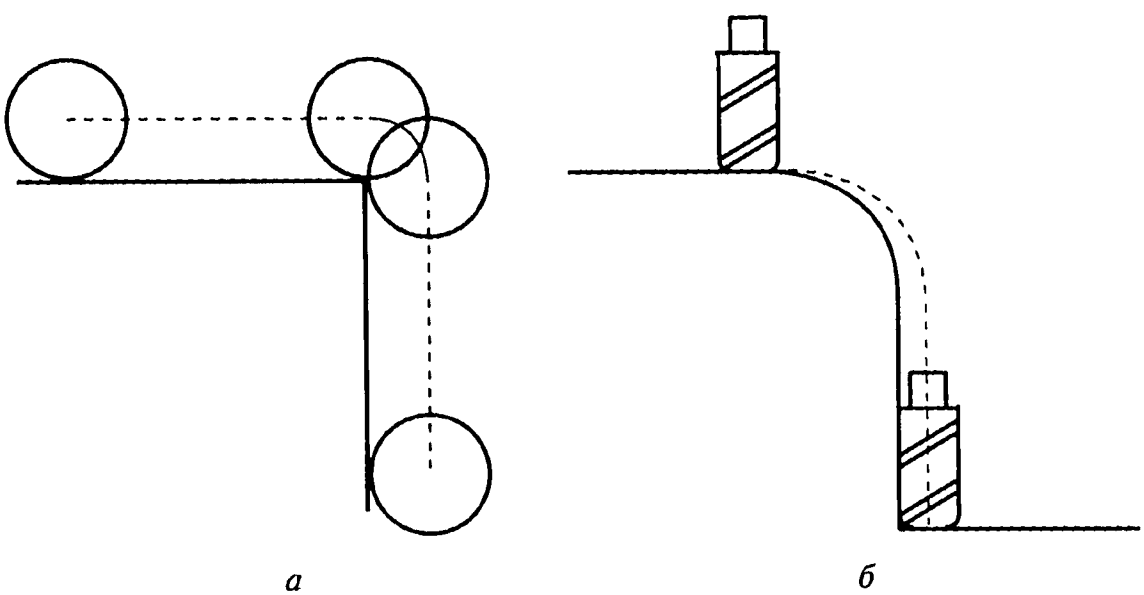
мах управления программа обработки воплощается в физических аналогах: копирах, кулачках, путевых упорах, положении штекеров коммутационной панели и т. п. Их изготовление является весьма трудоемким процессом и сопровождается погрешностями расчета профиля копиров и погрешностями их изготовления. При эксплуатации копиры изнашиваются, что вносит дополнительную погрешность.

В системах с ЧПУ управляющая программа включает в себя:

- технологические команды, подобные командам ПЛК (выбор инструмента, задание скорости вращения шпинделя и подачи, включение-выключение подачи СОЖ и т. п.);
- геометрические команды перемещения рабочего органа по некоторой траектории, отсутствующие в ПЛК (задание координат последовательных положений РО);
- подготовительные команды, служащие для управления самим устройством управления и задания режимов его работы.

Каждая команда — это совокупность символов и цифр, легко доступная пониманию человека (технолога-программиста устройств ЧПУ), что упрощает программирование и уменьшает число ошибок в программе. Ниже приведены основные термины, употребляемые при программировании УЧПУ.

Нулевая точка детали (нуль детали) — точка детали, координаты которой приняты за нулевые в системе координат, связанной с деталью. От нуля детали откладываются размеры обрабатываемых поверхностей. *Нулевая точка станка* (нуль станка) — точка в пространстве, имеющая нулевые координаты в системе координат, связанной со станком (обычно совпадает с базовой точкой зажимного приспособления). Оси координат системы станка обычно параллельны направляющим станка и оси вращения шпинделя.



а *б*

Рис. 3.63. Примеры расчетных траекторий

Центр инструмента — неподвижная относительно державки точка инструмента, для которой ведется расчет траектории. Для резца это его вершина, для фрезы — точка пересечения оси фрезы с ее торцом.

Система координат станка определяется конструкцией станка, а у каждой детали может быть одна или несколько своих систем координат, которые определяются, исходя из удобства описания обрабатываемых поверхностей. Геометрические команды УП задаются в системе координат детали и в процессе выполнения УП переводятся в систему координат станка.

Исходная точка (станка) — точка в системе координат станка, используемая как начальная точка работы УП, связывающая нуль станка и нуль детали.

Расчетная траектория — траектория центра инструмента, которая рассчитывается по геометрии обрабатываемых поверхностей с учетом геометрии инструмента. В простейшем случае расчетная траектория совпадает с контуром детали (например, при точении, когда центром инструмента является вершина резца). Это может быть эквидистанта (рис. 3.63, *а*) или более сложная кривая (рис. 3.63, *б*).

Опорная геометрическая или *технологическая точка* — это точка расчетной траектории, в которой происходит изменение закона, описывающего траекторию, или изменение условий обработки.

Ниже приведена простейшая программа на универсальном языке программирования УЧПУ CLDATA (Catter Location Data — данные о положении режущей кромки для наружного точения цилиндрической поверхности и подрезки торца (рис. 3.64) с комментариями, составленная в соответствии со стандартом ISO.

Координаты точек траектории задаются от нулевой точки детали, которой в рассматриваемом примере служит точка пересечения оси детали с ее правым торцом, ось Z направлена по оси детали вправо, ось X — по радиусу.

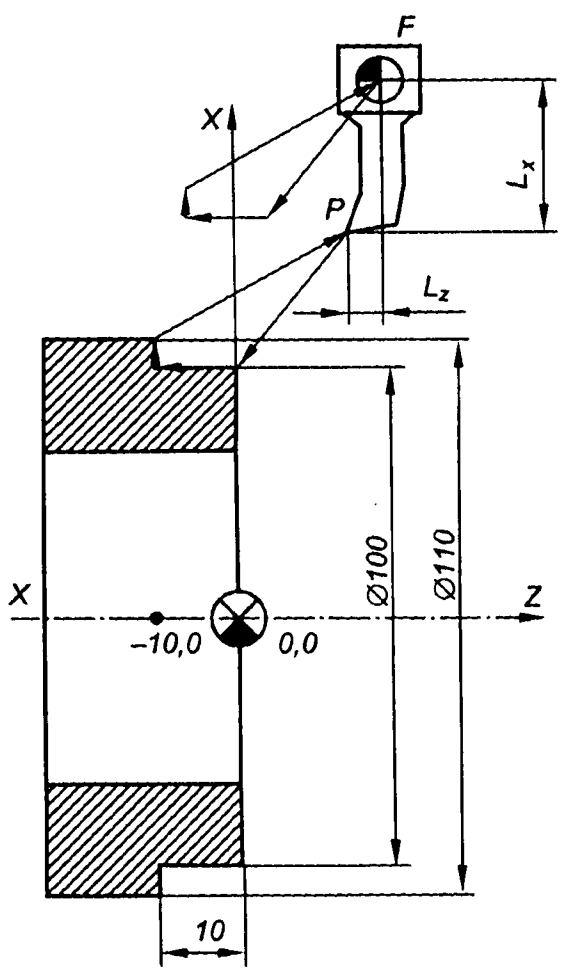


Рис. 3.64. Схема точения наружной цилиндрической поверхности и подрезки торца на станке с ЧПУ

N10 G90 G95 S670 M4 — координаты точек траектории — абсолютные (G90), задание частоты вращения шпинделя: установить частоту вращения (G95) 670 об/мин (S670)), вращение против часовой стрелки (M4);

N15 G0 X50 Z1.5 T11 M8 — быстрый подвод инструмента: позиционирование (G0) инструмента с кодом 11 (T11) в точку с координатами X = 50 мм (X50), Z = 1,5 мм (Z1.5), 1,5 мм — заходный участок, включить охлаждение с кодом 8 (M8);

N20 G1 Z-10 F0.35 — рабочий ход — точение: линейная интерполяция (G1) (траектория — отрезок прямой) из предыдущей точки X = 50 мм, Z = 1,5 мм в точку с той же координатой X и координатой Z = −10 мм (Z−10) с осевой подачей S = 0,35 мм/об (F0.35);

N25 G95 S837 M4 — задание частоты вращения шпинделя: установить частоту вращения (G95) 837 об/мин (S837)), вращение опять против часовой стрелки;

N30 G1 X56 F0.3 — подрезка торца вверх на 5+1 мм: линейная интерполяция (G1) в точку X = 56 мм, Z = −10 мм (X56) с радиальной подачей S = 0,3 мм/об (F0.3);

N35 G0 X70 Z30 — быстрый отвод инструмента вправо: позиционирование в точку X = 70 мм, Z = 30 мм (Z30);

N40 M02 — конец программы.

Программа набивается на перфоленте или записывается на магнитную ленту или диск, после чего команды вводятся в УЧПУ, расшифровываются, УЧПУ выдает приказы рабочим органам станка, ожидает окончания выполнения текущей команды и переходит к следующей. Каждая команда предусматривает автоматическое выполнение системами управления станка сложных действий, связанных с перемещениями рабочих органов по времени в условиях возмущений со стороны внешней среды (колебания напряжения питания, твердости заготовки, трения и т.д.). Команды выполняются последовательно, переход к следующей команде возможен только после завершения выполнения текущей.

Кадр управляющей программы — часть УП, выполняемая как единое целое (подвод инструмента, проход и т.д.). *Блок* или *глава*

управляющей программы — совокупность кадров, выполняемых при одной настройке технологической системы (рассмотренный выше пример). *Главный кадр управляющей программы* — первый после остановки обработки задает новые настройки технологической системы, необходимые для продолжения обработки. Остальные кадры блока (главы) задают последовательное изменение настроек, определенных главным кадром.

В ПЗУ УЧПУ помещены в виде подпрограмм последовательности управляющих сигналов, необходимые для выполнения станком основных действий, связанных с обработкой заготовки. УЧПУ является интерпретатором, который расшифровывает очередную команду УП и запускает соответствующую подпрограмму выполнения этой команды (например, подпрограмму управления быстрым подводом инструмента в нужную точку G0), приводящую к срабатыванию реле, муфт, путевых переключателей и т.д. и обеспечивающую выполнение различных технологических команд (смена инструмента, переключение частот вращения шпинделя, перемещение суппорта и т.д.).

Постоянный цикл — часто встречающаяся последовательность команд УП, оформленная в виде стандартной подпрограммы УЧПУ, которая вызывается одной макрокомандой УП (например, подпрограммы точения цилиндрической поверхности, нарезания резьбы, сверления отверстий). Использование циклов упрощает программирование и уменьшает длину УП.

Интерполятор — блок УЧПУ, ответственный за вычисление координат промежуточных точек траектории, которую должен пройти инструмент между точками, заданными в УП. Интерполятор имеет в качестве исходных данных команду УП перемещения инструмента от начальной до конечной точки по контуру в виде отрезка прямой, дуги окружности и т.п., например:

```
N15 G0 X50 Z1.5 T11 M8  — быстрый подвод по прямой;
N20 G1 Z-10 F0.35       — рабочий ход по прямой.
```

Результатом работы интерполятора являются последовательности управляющих импульсов для привода подач, выдаваемых в нужные моменты времени, обеспечивающие требуемые скорость и величину перемещения суппорта, или требуемые законы $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ изменения координат рабочего органа во времени. Именно интерполятор является задатчиком для системы автоматического управления многокоординатным приводом подач, воспроизводящим требуемую траекторию.

Для обеспечения точности воспроизведения траектории порядка 1 мкм (точность датчиков положения и точность позиционирования суппорта составляют порядка 1 мкм) интерполятор выдает управляющие импульсы каждые 5... 10 мс, что требует от него высокого быстродействия.

С целью упрощения алгоритма работы интерполятора заданный криволинейный контур формируется обычно из отрезков прямых линий или из дуг окружностей, причем часто шаги перемещений по разным осям координат выполняются не одновременно, а поочередно. Тем не менее за счет высокой частоты выдачи управляющих воздействий и инерционности механических узлов привода происходит сглаживание ломаной траектории до плавного криволинейного контура. УП составляется в расчете на некоторый стандартный инструмент, реальный инструмент имеет отличающиеся размеры и изнашивается при работе. Формирование нового варианта УП для каждого инструмента трудоемко, хранение большого числа вариантов УП неудобно. В станках с УЧПУ предусмотрена возможность коррекции: настройки УЧПУ вручную или командами УП на конкретный инструмент. При выполнении УП каждая команда будет автоматически скорректирована для учета реального вылета инструмента (путем параллельного переноса) и радиуса режущей кромки (расчетом эквидистанты). На рис. 3.64 показана траектория вершины резца, заданная в УП, и траектория базовой точки F резцедержателя, сдвинутая вверх на L_x — вылет резца по оси X и вправо на L_z — вылет резца по оси Z.

Возможна автоматическая коррекция траектории с учетом износа инструмента (коррекция вылета) или коррекция подачи при недопустимом росте сил резания, момента привода шпинделя, вибрациях (адаптивное управление). В этом случае происходит многоуровневая коррекция, меняющаяся во время обработки.

Системы ЧПУ делят на *позиционные системы*, осуществляющие установку рабочего органа в заданной точке пространства, причем траектория перемещения определяется самим УЧПУ, и *контурные системы*, обеспечивающие перемещение рабочего органа по заданной в УП траектории с заданной контурной скоростью.

Позиционные системы характерны для операций сверления, точечной сварки, отрезки, когда траектория значения не имеет, и движение выполняется обычно по прямой с поочередным или одновременным изменением координат.

Контурные системы ЧПУ используются при обработке поверхностей на токарных и фрезерных станках, когда требуемая поверхность воспроизводится совместным перемещением инструмента и заготовки. Контурные системы ЧПУ включают обычно и функции позиционных систем. Так, рассмотренная выше УП составлена для контурного устройства управления токарным станком (траектория перемещения резца во время рабочего хода задается командой G1), однако в УП присутствует типичная для позиционных систем команда быстрого подвода рабочего органа (G0).

Для жесткой синхронизации перемещения по координатам и вращения шпинделя в УЧПУ в качестве тактового задатчика (вме-

сто таймера в ЭВМ) могут использоваться импульсы от датчика скорости вращения привода главного движения. Управление приводами станка происходит преимущественно импульсами, поэтому УЧПУ является импульсным устройством, оснащенным УСО с импульсными входами-выходами.

Бурное развитие электроники обусловило постоянное усложнение УЧПУ. Простейшими являются системы ЧПУ класса NC (Numeric Control).

Следующим поколением УЧПУ были системы класса SNC (Stored Numeric Control), построенные на интегральных микросхемах, имеющих большую надежность и возможности и меньшие габариты, что и привело к росту мощности команд входного языка, упрощению программирования и сокращению размеров УП. Системы этого класса имели ОЗУ, достаточное для запоминания всей УП; это сделало возможным однократный ввод УП в ОЗУ и многократное ее выполнение при обработке серии деталей, эксплуатационные характеристики этих систем значительно улучшились.

Использование управляющей миниЭВМ в качестве УЧПУ вместо специальных блоков управления привело к созданию систем класса DNC (Direct Numeric Control). Ввиду высокой стоимости миниЭВМ тех времен и ее больших габаритов ЭВМ размещалась вне зоны обработки и управляла несколькими станками одновременно.

Использование универсальной ЭВМ в качестве УЧПУ позволило:

реализовать алгоритмы управления в виде программ ЭВМ, что обусловило гибкость системы;

строить УП из мощных команд с использованием подпрограмм-циклов, что упрощает программирование и делает УП короткой;

загружать УП с перфоленты, магнитного диска или передавать их по сети из архива.

С появлением микроЭВМ появилась возможность разместить УЧПУ непосредственно на станке применительно к этому конкретному станку. Системы этого класса называются CNC (Computer Numeric Control) и обладают следующими особенностями:

используются однотипные ЭВМ для управления разнообразными станками, что позволяет унифицировать УЧПУ, снизить их стоимость, повысить надежность и упростить программирование УЧПУ;

алгоритмы управления, учитывающие специфику станка, включены в микросхему ПЗУ, что обеспечивает надежность их хранения и гибкость УЧПУ благодаря простоте замены одной микросхемы ПЗУ на другую.

Соединение с помощью вычислительной сети отдельных систем УЧПУ (CNC), управляющих станками, роботами, транспортными

устройствами и т.д., с ЭВМ, хранящей архивы УП и взаимоувязывающей работу отдельных единиц оборудования с ЧПУ, привело к созданию гибких производственных систем. В этих системах центральная ЭВМ синхронизирует работу всех УЧПУ, входящих в ГПС, контролирует исправность узлов, служит пультом оператора, связана по сети с системами управления высших уровней: автоматическими системами управления производством (АСУП), системами автоматического проектирования и др., что обеспечивает бесперебойное снабжение сырьем, инструментом и т.д.

Рост мощности ЭВМ, используемых в качестве УЧПУ класса CNC, привел к созданию систем класса HNC (Handled Numeric Control), оснащенных мощным процессором, магнитным диском и качественным дисплеем, допускающих простой ручной ввод и отладку УП на станке с использованием вспомогательных инструментов программирования.

Чем мощнее УЧПУ, тем мощнее операторы его входного языка (вплоть до CLDATA), короче и понятнее УП, в ней меньше ошибок, проще ручное и автоматизированное программирование УЧПУ.

Составление УП обработки сложных деталей требует высокой квалификации программиста, а ошибки в ней ведут к поломкам дорогостоящего оборудования и травмам людей. Поэтому ручное программирование заменяется на автоматизированное, при котором человек в диалоге с системой автоматизации программирования УЧПУ (САП), установленной на ЭВМ общего назначения, решает технологические задачи, а САП выполняет детальное кропотливое оформление команд для УЧПУ.

На рис. 3.65 приведена схема создания и выполнения программы для УЧПУ. Геометрия детали и технологическая информация задаются или в виде операторов описания исходных данных для САП (обычно это один из вариантов общепринятого языка APT), или в диалоге с программой подготовки данных изображением геометрии детали в графическом редакторе и выбором информации из предлагаемых ЭВМ таблиц и меню.

Всякая САП представляет собой набор программирующих программ, включающий такие программы, как препроцессор, процессор и постпроцессор.

Препроцессор САП предназначен для предварительного анализа исходных данных. Процессор САП рассчитывает траекторию, опорные точки и формирует УП обычно на CLDATA — языке программирования некоего абстрактного УЧПУ, принятого за стандартное. Если реальное УЧПУ станка требует УП на своем входном языке, УП переводится в этот язык в постпроцессоре САП. Далее УП загружается в УЧПУ и выполняется.

Операторы по очереди расшифровываются в устройстве управления (УУ), выдающем по мере надобности управляющие им-

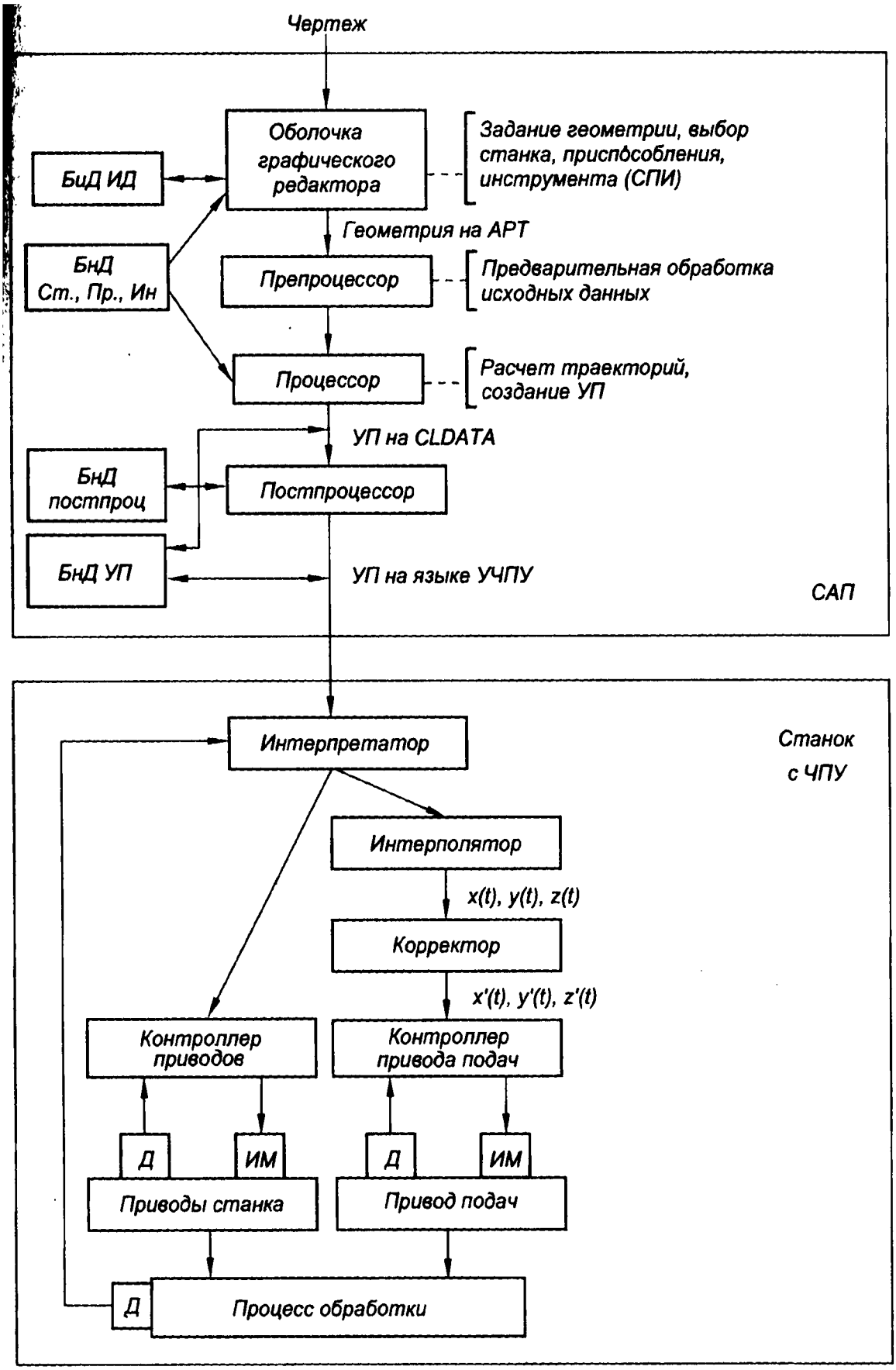


Рис. 3.65. Схема подготовки и выполнения управляющей программы станка с ЧПУ

пульсы на контроллеры привода главного движения, закрепления инструмента и т.д. Геометрические команды передаются в интерполятор, задающий приводу подач требуемые законы изменения координат центра инструмента. Корректор учитывает особенности реальной геометрии инструмента, после чего управляющие импульсы поступают на привод подач.

При обработке соответствующие датчики контролируют срабатывания муфт и электроприводов, положения суппорта, крутящего момента привода главного движения, сил резания, уровня вибраций и т.д.

САП ЧПУ опирается на банки данных (БнД), содержащие следующие компоненты:

- схемы и наладки для обработки типовых поверхностей (наружное/внутреннее точение, нарезание резьбы, выполнение канавок, сверление, фрезерование паза и т.д.);
- библиотеку простейших графических элементов для геометрических изображений (окружности, эллипсы, прямоугольники, отверстия, зубья, шестерни и т.д.);
- технические характеристики станков, приспособлений, инструментов;
- данные для расчета режимов обработки;
- архив ранее разработанных переходов, операций;
- архив готовых УП;
- архив постпроцессоров для разных УЧПУ.

Станки с УЧПУ, а значит и САП, специализированы:

токарные станки — 2-координатные в плоскости XZ (см. рис. 3.64);

фрезерные, сверлильные станки — 2,5-координатные, объемные фигуры задаются сечением в плоскости XY и высотой Z; 2,5-координатные станки — это значит, что одновременно управляются две координаты (X и Y), после чего обработка в плоскости XOY останавливается и производится перестановка по оси Z в новую плоскость XOY.

сверлильно-расточные многоинструментные обрабатывающие центры — 3-координатные.

САП позволяет смоделировать и изобразить на экране траекторию инструмента и процесс съема металла, что удобно для контроля УП. САП допускает коррекцию УП вручную на любом этапе подготовки.

Существует множество САП ЧПУ, простейшие из которых предусматривают ввод исходных данных на входном языке типа APT, расчет траекторий, генерацию УП на CLDATA и перевод ее (если нужно) во входной язык УЧПУ. Более сложные САП способны в диалоге с технологом по чертежу детали, выполненному на одном из стандартных пакетов машинного черчения, сформировать технологический процесс, спроектировать отдельные операции с выбором необходимого станка, приспособления, инст-

румента, рассчитать последовательность переходов и проходов, рассчитать режимы обработки и т.д.

Применение САП, созданных при участии и на основе опыта квалифицированных технологов-программистов, значительно упрощает программирование УЧПУ и повышает качество программ, что создает предпосылки для широкого применения оборудования с ЧПУ.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются принципы разомкнутого управления, принцип компенсации и принцип отрицательной обратной связи?
2. Каковы преимущества и недостатки систем, построенных на приведенных выше принципах?
3. Какой принцип управления следует применить при создании простой системы управления, работа которой мало зависит от окружающей среды, а элементы стабильны и надежны?
4. Какой принцип управления следует применить при создании системы, подверженной влиянию большого количества разнообразных внешних факторов, нескольких заранее известных факторов?
5. Что делает систему управления дискретной?
6. Является ли непрерывной система управления на базе микропроцессора?
7. Чем отличаются и чем похожи системы программного управления, стабилизации и следящие системы?
8. Какова причина возникновения зоны насыщения и петли гистерезиса в характеристике элемента системы управления?
9. Чему равен передаточный коэффициент параллельного и последовательного соединения элементов?
10. Чему равен передаточный коэффициент элемента, охваченного положительной обратной связью? отрицательной обратной связью?
11. Как экспериментально определить передаточный коэффициент элемента системы управления?
12. Как связана постоянная времени инерционного звена со статической характеристикой?
13. Чем отличается частота среза сигнала от частоты среза элемента?
14. Каково главное преимущество электрических элементов?
15. Каков главный недостаток пневматических элементов?
16. Почему измеряемый параметр, как правило, сразу преобразуют в электрический сигнал?
17. Чем отличается датчик от измерительного прибора?
18. В чем отличие требований к конструкции датчика и указателя?
19. В чем отличие генераторного и параметрического измерительных преобразователей?
20. Почему элементы автоматики следует проектировать с соблюдением стандарта на диапазоны входного и выходного сигналов?
21. Какова область применения цифровых первичных преобразователей?

22. Что является входным и выходным параметром индукционного датчика перемещения?

23. В каких случаях удобнее использовать абсолютную, а в каких — относительную погрешность?

24. Чем отличается систематическая погрешность от случайной?

25. Какой вид погрешности обработки свидетельствует об износе станка?

26. Какой вид имеет характеристика контактного преобразователя, реостата?

27. Почему для электромагнитных и емкостных датчиков используются измерительные цепи переменного тока?

28. Назовите главный недостаток емкостных датчиков по сравнению с электромагнитными.

29. Перечислите основные источники погрешности при использовании тензодатчика.

30. Каков принцип действия термопары?

31. Каков принцип действия терморезистора?

32. Назовите основные области применения электронных, гидро- и пневмоусилителей.

33. Что такое каскад усилителя?

34. Что такое коэффициент усиления?

35. Какие параметры системы управления меняют с помощью корректирующих устройств?

36. Приведите статическую характеристику поляризованного и нейтрального реле.

37. Какова область применения электромагнитных муфт?

38. Что такое триггер?

39. Укажите область применения АЦП и ЦАП.

40. Какова физическая реализация задатчиков в современных системах управления?

41. Что входит в состав электро-, гидро- и пневмопривода?

42. На каком принципе построены системы автоматического регулирования?

43. Каковы главные недостатки механических копировальных систем?

44. Какова область применения специализированных управляющих ЭВМ?

45. Из каких основных модулей состоит УСО?

46. Какие формы представления алгоритма вы знаете?

47. Каково назначение операционной системы?

48. Какова цель тестирования программы? (выберите правильный ответ):

а) демонстрация работоспособности программы заказчику;

б) выявление ошибок и недоработок в программе в «неудобных» условиях;

в) проверка работы программы в типичных условиях.

49. В чем отличие ПЛК от управляющей ЭВМ?

50. В чем отличие ПЛК от устройства ЧПУ?

51. Чем отличаются контурные системы ЧПУ от позиционных?

ГЛАВА 4
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ И РОБОТОТЕХНИКИ

4.1. Технологические предпосылки автоматизации на базе гибких производственных систем и робототехники

Значительным шагом в области технологии машиностроения явилось создание принципов *групповой технологии обработки.* Такая технология позволяет снизить требования ко времени и условиям переналадки, разделив затраты времени и ресурсов на две группы: на сравнительно небольшие затраты при обработке деталей в пределах одной группы и на большие затраты при переходе от одной группы деталей к другой, что обычно требует практически полной замены приспособлений, инструмента и оснастки.

Для выполнения современных требований к гибкости производства необходимо обращать внимание не только на технологичность самого изделия, но и на организацию всего рабочего процесса на участке, цехе или предприятии в целом. Требуется решение множества вопросов, связанных с технической и материальной подготовкой производства при сохранении приемлемых экономических показателей.

Опыт развития машиностроительного производства, накопленный за последние годы в различных странах, показывает, что достижение требуемой гибкости производственной системы может быть обеспечено только при реконструкции организации производства в целом, ее совершенствования в первую очередь на основе широкого использования компьютерной техники на всех этапах производства, начиная от формирования портфеля заказов и до сбыта готовой продукции. Такая концепция приводит к построению так называемых интегрированных производств, где объединяется (интегрируется) сфера материального производства и сфера информационной технологии. Необходима частичная или полная автоматизация интеллектуальной деятельности людей, участвующих в плановой, организационной, экономической, конструкторской и технологической подготовке производства и контроле за его результатами, а также занятых управленческой и финансово-сбытовой деятельностью.

Задачи управления гибким многономенклатурным производственным участком отличаются от обычных вычислительных задач и от проблем управления традиционным автоматизированным технологическим оборудованием. В многономенклатурном производстве не может быть однозначно задано заранее все многообразие действий системы управления. Однако можно описать общие закономерности, определяющие выбор адекватных управленческих решений в любых возникающих производственных ситуациях.

Многономенклатурные производства представляют собой совокупность технологического оборудования, большей частью с ЧПУ, соединенного транспортно-накопительными системами различной степени целостности и законченности, структуры и разной степени автоматизации. Ход производственного процесса в таких системах и движение грузопотоков во время производственного цикла определяются неоднократно в течение всего периода эксплуатации применительно к конкретным производственным заданиям.

К числу параметров, определяемых на этапе проектирования, относятся выбор той или иной структуры производственной системы, определение емкостей локальных накопителей, допустимых для данного числа объединяемых станков, и некоторые другие.

К эксплутационным параметрам следует отнести наличие и местонахождение «узких» мест в движении грузопотоков, длину очередей к каждому станку и изменение этих очередей во времени, а также ряд временных показателей — среднее время транспортировки одной грузоединицы, среднее время ожидания транспортировки и ожидания начала обработки, общее среднее время пребывания грузоединицы в системе и некоторые другие.

Развитие технологических процессов в различного рода металлообрабатывающих производствах примерно до середины 60-х годов XX века характеризовалось преимущественно интенсификацией методов обработки, что привело к значительному увеличению производительности отдельных операций. Однако время выполнения операций составляет в среднем для различных видов дискретного производства лишь около 6—8 % длительности всего производственного цикла, в который входит также время транспортных операций, подготовки и окончания выполнения работ и различного рода ожидания. Это приводит к недопустимо высокому замедлению оборачиваемости оборотных средств, которое составляет до 40 % стоимости конечной продукции. Это происходит потому, что маршрут создания продукции оказывается, как правило, технологически и организационно плохо обеспеченным. Качество управления и уровень автоматизации в многономенклатурных производственных процессах, составляющих 70—80 % обще-

о объема дискретных производств, до последнего времени повышались незначительно. Достаточно высокий уровень автоматизации и высокое качество управления характерны лишь для массового производства изделий одного наименования, где давно и с успехом применяют традиционные поточные и автоматические линии.

Решение проблемы повышения эффективности многономенклатурного единичного и мелкосерийного дискретного производства в машиностроении основывается на создании таких методов организации и управления, которые обеспечивают полную обработку изделий при достаточно высокой производительности и при степени автоматизации, близкой к технологии с участием малого количества обслуживающего персонала.

В современных технологических комплексах, используемых в многономенклатурном дискретном производстве, должны выполняться следующие требования:

- интенсификация и автоматизация технологических операций;
- высокий уровень автоматизации всех стадий производства, включая подготовку и управление ходом маршрута в целом;
- координация процессов выполнения технологических операций с операциями транспортирования, складирования и управления.

Необходимость удовлетворять названным требованиям привела к появлению новых принципов организации и управления технологическими процессами. Эти принципы реализуются в различных комплексах технологического оборудования, которые в широком смысле могут быть названы *гибкими производственными системами* (ГПС).

Появление подобных систем сделали возможным следующие технические предпосылки:

- создание современного автоматизированного оборудования, в том числе с ЧПУ, на базе унифицированных модульных узлов, в ряде случаев обслуживаемого роботами, манипуляторами либо другими типами устройств, обеспечивающих автоматизацию вспомогательных и установочных операций;
- создание устройств, обеспечивающих автоматическое хранение, поиск, транспортирование и установку грузоединиц с использованием компьютерной техники управления;
- появление достаточно надежной и относительно дешевой компьютерной техники, позволяющей строить как связанные, так и несвязанные информационно-управляющие структуры для отдельных технологических единиц и их комплексов.

Для современных производственных комплексов характерны высокая степень технологической, параметрической и структурной гибкости, широкое применение типовых технологических и управленческих решений.

По технологическому признаку гибкие производственные системы в различного рода дискретных производствах могут быть разделены на две группы.

ГПС первой группы предназначены для выпуска с высокой производительностью крупных серий узкого спектра деталей характеризующихся высокой степенью конструктивного и технологического подобия (так называемых закрытых семейств изделий). Примером таких деталей могут служить блоки цилиндров автомобильных двигателей, изготавливаемых в вариантах 4 либо 6 цилиндров, с расточками под гильзы различных диаметров. Еще одним примером такого рода являются детали типового домостроения, выпускаемые для различных, но близких типовых проектов. Такие технологические задачи решают, применяя разновидность ГПС, называемую гибкой переналаживаемой линией (ГПЛ). На такой линии поток изделий перемещается с заданным ритмом по рабочим позициям, расположенным в соответствии с технологическими маршрутами и связанным внутренними межстаночными транспортными устройствами. Прохождение изделием производственного цикла определяется технологическим маршрутом и соответствующим этому маршруту расположением оборудования. Для этой разновидности ГПС характерно то, что для перехода к выпуску изделий другого наименования необходимо остановить поток, завершить обработку имеющегося задела, остановить оборудование, произвести переналадку оборудования и затем снова запустить поток. Таким образом, одновременно в производстве на гибкой поточной линии могут находиться изделия только одного наименования.

Для выпуска изделий широкой номенклатуры, ограниченной только техническими характеристиками применяемого оборудования и специализацией производственного персонала и обладающей в этих пределах большим технологическим разнообразием (так называемых открытых семейств изделий), создаются гибкие производственные системы второй группы, характеризующиеся иной организационной и функциональной структурой.

Для этой разновидности производств характерно движение изделий от одной единицы оборудования к другой по произвольному изменяемому маршруту с возможностью его прерывания. Маршрут движения изделий и последовательность выполнения над ними технологических операций не связаны с расположением оборудования или с неизменным порядком чередования специализированных производственных бригад, а определяются планами работы производственного комплекса и расписанием загрузки оборудования и направления на объекты упомянутых производственных бригад, составляемыми многократно на этапе эксплуатации производственного комплекса применительно к конкретному изделию. Здесь возможно одновременное нахождение в производстве изделий различных наименований, не требуется обязатель-

ого выравнивания для различных изделий времени пребывания на соответствующих операциях технологического маршрута, а также числа этих операций.

К ГПС данной разновидности относятся технологические комплексы разного масштаба, различной степени сложности и уровня автоматизации — от гибких участков и цехов до гибких автоматизированных производств и объединений.

Обеспечение выполнения автоматических циклов работы оборудования и деятельности специализированных бригад, координация функционирования комплектов оборудования, специализированных производственных бригад и других производственных единиц в соответствии с производственным планом составляет задачу организации многономенклатурного производственного процесса и управления его ходом, базирующегося на его прогнозировании при соответствующей организации производственного документооборота.

Таким образом, многономенклатурные дискретные гибкие производства независимо от их природы, характеризуются одновременной работой над несколькими изделиями с выполнением при этом отдельных операций технологического маршрута на характерном для этих операций технологическом оборудовании. Изделия, соответствующее оборудование и персонал, занятый выполнением конкретных операций, перемещаются относительно друг друга в соответствии с расписанием загрузки оборудования.

Работа в условиях рынка со свободными связями между поставщиком и потребителем заставляет соответствующим образом оценивать приоритеты в экономической и технической политике. Основным показателем эффективности работы предприятия в этих условиях является прибыль как интегральная оценка всей производственной деятельности.

Эффективность производства и полученная норма прибыли не только зависят от выпускаемой продукции, но и во многом определяются совершенством организации ее выпуска. Успешный сбыт продукции зависит не только от ее цены и качества, но и от соответствия запросам потребителя и сроков выполнения заказа. Кроме того, прибыль зависит от расхода материальных, энергетических и человеческих ресурсов, в том числе и интеллектуальных.

Приоритетное удовлетворение запросов различных конкретных потребителей требует разнообразия в продукции машиностроения, увеличения номенклатуры его изделий, снижения серийности. Производителю машин необходимо проявлять гибкость, продукция машиностроения должна обладать большим количеством модификаций при минимальных сроках и стоимости перестройки производственного процесса.

Отток людей из сферы производства порождает дефицит квалифицированной рабочей силы, что заставляет искать пути ее

восполнения за счет более высокого уровня автоматизации, в том числе на финишных и сборочных операциях.

Технико-экономические показатели машиностроительного производства определяются уровнем технологии для выполнения заготовительных операций (литья, штамповки, проката и др.), операций механической обработки, химико-термической обработки, окраски и сборки.

Эффективность механической обработки в машиностроении до настоящего времени определяют традиционные операции формообразования со снятием стружки, а именно точение, сверление, фрезерование, шлифование и др. Удельный вес этих формообразующих операций (как следует из литературных данных) по станкоемкости близок к 98 %, а по трудоемкости — к 98,5 %. В этой связи чрезвычайно актуальна задача совершенствования традиционных методов механической обработки, ориентированных на гибкое технологическое оборудование с ЧПУ. В табл. 4.1 и 4.2 приводятся данные о снижении станкоемкости за счет лучшего использования возможностей станка, инструмента и приспособлений.

Таблица 4.1

Факторы, определяющие снижение станкоемкости	Коэффициент снижения			
	Корпусные детали	Шпиндели, пиноли	Валы	Мелкие детали
Сокращение вспомогательного времени, времени смены инструмента и подналадки	1,5	1,5	1,5	—
Повышение качества заготовок	1,2	1,8	2,2	—
Применение комбинированного (многолезвийного) инструмента	1,15	—	—	—
Применение новых режущих материалов, конструкций инструментов, оптимизация режимов	1,3	—	—	1,3
Использование операций многошпиндельной обработки	1,2	—	—	—
Уменьшение припусков на шлифование, сокращение количества шлифовальных операций	—	1,8	—	—

Сокращение вспомогательного времени, времени смены инструмента и подналадки обеспечивается повышением быстродействия механизмов станка, увеличением емкости инструментальных магазинов, использованием устройств наблюдения за режимом резания, размерами обрабатываемых поверхностей и состоянием режущего инструмента. Существенный эффект достигается

Таблица 4.2

Вид работ	Затрачиваемое время по вариантам				Коэффициент сокращения
	Станкоемкость, мин	Доля, %	Станкоемкость, мин	Доля, %	
Основное технологическое время					
Фрезерование	112	64	26	40	4,25
Сверление	43	23	16,64	25	2,7
Растачивание (в том числе комбинированным инструментом)	27	13	10	15	2,5
Многошпиндельная обработка	—	—	3,36	6	—
Измерение	—	—	10	15	—
Итого	182	10	66	10	2,76
Вспомогательное время					
Все виды работ	49	—	14	—	3,45
Всего	231	—	80	—	2,9

при смене режущего инструмента после его износа в цикле автоматической работы станка при использовании централизованного функционального контроля.

Качество заготовок, влияющее на стабильность процесса обработки, зависит от материала детали. Для деталей из чугуна его можно повысить за счет применения модифицированных чугунов с улучшением химического состава путем соответствующих изменений содержания углерода, кремния и марганца, чем достигается стабильность формы и размеров отливок, уменьшение литейных дефектов. Для деталей из стали повышение качества заготовок достигается применением марок сталей с добавлением кальция (типа сталей АЦ 45, АЦ 40Х). Использование таких сталей, обладающих повышенной обрабатываемостью, позволяет увеличить скорость резания в 1,6 раза при одновременном повышении стойкости инструмента.

Чем сложнее технологическая система, тем более высоким требованиям должен удовлетворять инструмент.

Для современного режущего инструмента характерно увеличение износо- и жаростойкости инструментальных материалов, улучшение характеристик вязкости, сокращение разброса эксплутационных свойств. Для черновой обработки закаленных сталей продолжают разрабатываться вольфрамо-кобальтовые сплавы, а для чистовой и отделочной обработки предлагаются материалы повышенной износостойкости на базе титана и керамические материалы. Можно ожидать расширения применения твердых сплавов на базе вольфрама и оксидной керамики.

Расширяется применение покрытий для улучшения режущих свойств инструмента. В настоящее время около 60 % инструментов, применяемых в механической обработке, выполнено с покрытиями. Наносятся такие покрытия, как TiC, Ti(C,N), AlO, AlON и др., в том числе на концевые фрезы и на спиральные сверла.

Имеются данные, показывающие целесообразность исключения оператора из процессов обработки, которые получены в результате оценки его занятости при работе на станках с ЧПУ типа «Обрабатывающий Центр». Эти данные сведены в табл. 4.3, где n обозначает количество минут занятости оператора за 1 ч работы оборудования, а T — число часов занятости оператора за 1 год.

Таблица 4.3

Вид работы	Показатели занятости оператора при обработке					
	чугуна		стали		алюминия	
	n	T	n	T	n	T
Уборка стружки	1,6	64	4,2	194	3,3	93
Обеспечение подачи СОЖ	1,6	33	2,2	19	6,2	22
Измерение детали	2,6	81	1,9	50	0,5	24
Поддержание работоспособности инструмента	1,1	138	0,9	205	0,1	50
Регулировка параметров режимов	0,7	4	0,7	4	0,7	4
Наблюдение за процессом обработки	0,8	28	2,6	99	—	—
Установка, снятие и перезакрепление детали	2,2	351	0,9	283	2,9	440
Обслуживание станка	0,5	63	0,5	63	0,5	63
Подготовка заготовок к обработке	0,8	73	0,5	45	0,2	11
Подготовка детали к сдаче в ОТК	0,7	58	0,3	21	1,4	66
Итого	12,64	893	15,08	983	16,32	773

Из табл. 4.3 видно, что оператор в среднем занят 15 мин в час (25 %). Из работ, выполняемых оператором, наибольшее время занимает установка и снятие детали (38 ... 57 %), измерение и подналадка режущего инструмента (25 %).

Обобщение опыта работы станков с ЧПУ показывает, что эти непроизводительные затраты времени оператором могут быть существенно уменьшены за счет следующих факторов:

- автоматизации удаления стружки из рабочей зоны;

• автоматизации измерения заготовки и обработанных поверхностей;

• контроля инструмента и поддержания его работоспособности;

• использования специальных датчиков, контролирующих процесс резания;

• автоматизации установки, снятия и перезакрепления детали с помощью роботов, сменных палет и других устройств.

Для уменьшения числа установов создаются новые конструкции станков, основанные на интеграции различных процессов механической обработки, а также на интеграции процессов формообразования различной физической природы (термомеханических, лазерно-механических и т. п.).

Для повышения надежности и точности обработки широко реализуется блочно-модульной принцип построения оборудования из узлов со встроенными распределенными системами управления, а также осуществляется оснащение станков средствами автоматической подналадки, наблюдения за процессом резания и защиты от аварий, инструментальными магазинами увеличенной емкости и системами автоматической смены инструмента, устройствами герметизации рабочей зоны, удаления стружки и др. Применяются также компоновочные решения, ориентированные на компьютеризацию производства, использование технологий с малым количеством обслуживающего персонала «закрытых» рабочих зон и т. п.

4.2. Современные гибкие производственные системы

Гибкие производственные системы представляют собой совокупность технологического оборудования и систем обеспечения его работы в автоматическом режиме при изготовлении изделий изменяющейся номенклатуры. Развитие ГПС происходит в направлении к безлюдной технологии, обеспечивающей работу оборудования в течение заданного времени без участия оператора.

Для каждого изделия при заданных требованиях к количеству и качеству продукции могут быть разработаны различные варианты ГПС, отличающиеся методами и маршрутами обработки, контроля и сборки, степенью дифференциации и концентрации операций технологического процесса, типами транспортно-загрузочных систем, числом обслуживающих транспортных средств (ОТС), характером межагрегатных и межучастковых связей, конструктивными решениями основных и вспомогательных механизмов и устройств, принципами построения системы управления.

Технический уровень и эффективность ГПС определяется такими показателями, как качество изделий, производительность ГПС и ее надежность, структура потоков компонентов, поступающих на ее вход. Именно с учетом этих критериев должны решаться такие

задачи, как выбор типа и количества технологического оборудования, межоперационных накопителей, их вместимости и мест их расположения, числа обслуживающих операторов, структуры и параметров транспортно-складской системы и т.п.

Гибкие производственные системы могут быть построены из взаимозаменяемых, из взаимодополняющих ячеек или же смешанным образом.

На рис. 4.1 показана схема гибкой системы из двух однотипных взаимозаменяемых обрабатывающих центров (ОЦ). Обрабатывающие центры обслуживаются двумя транспортными тележками (робокарами), поддерживающими движение материальных потоков (деталей, заготовок, инструментов). Обычным является управление в автоматизированном режиме. Если допускаются ручные операции, то оператору должна быть предоставлена определенная свобода действий. Управление совместной работой ОЦ и транспортной системой осуществляется от центральной ЭВМ.

В общем случае управлением робокарами осуществляется от центральной ЭВМ через промежуточное устройство или же от локальной системы управления (ЛСУ). Передача команд на робокары может осуществляться только на остановках, которые делят трассы движения на зоны. ЭВМ разрешает пребывание в конкретной зоне только одного робокара. Максимальная скорость движения может достигать 1 м/с.

Верхняя часть робокара для выполнения операций перегрузки, разгрузки и загрузки может подниматься и опускаться с помощью гидропривода. При отказе или отключении управления от ЭВМ робокар может управляться ЛСУ.

Существуют различные варианты робокаров, используемых в качестве транспортных средств в ГПС. Наиболее распространен вариант, когда робокар перемещается вдоль трека (маршрута, трассы) или иной конструкции, уложенной в полу или на его поверхности. Один из вариантов трассирования заключается в том, что на поверхность пола наносят трек в виде полосы (флюоресцентной, светоотражающей, белой с черной окантовкой), а маршрутослежение осуществляется оптоэлектронными методами. Недостатком является необходимость следить за чистотой полосы. Поэтому более распространенным является трассирование робокаров индуктивным проводником, уложенным в канавке на небольшой глубине (порядка 20 мм). Известны и другие интересные решения — с применением, например, телевизионного навигационного оборудования для свободного перемещения в пространстве под управлением ЭВМ.

Источником снабжения робокаров материальными потоками является автоматизированный склад со штабелерами, осуществляющими адресуемый доступ к любой ячейке склада. Склад сам по себе является достаточно сложным объектом управления.

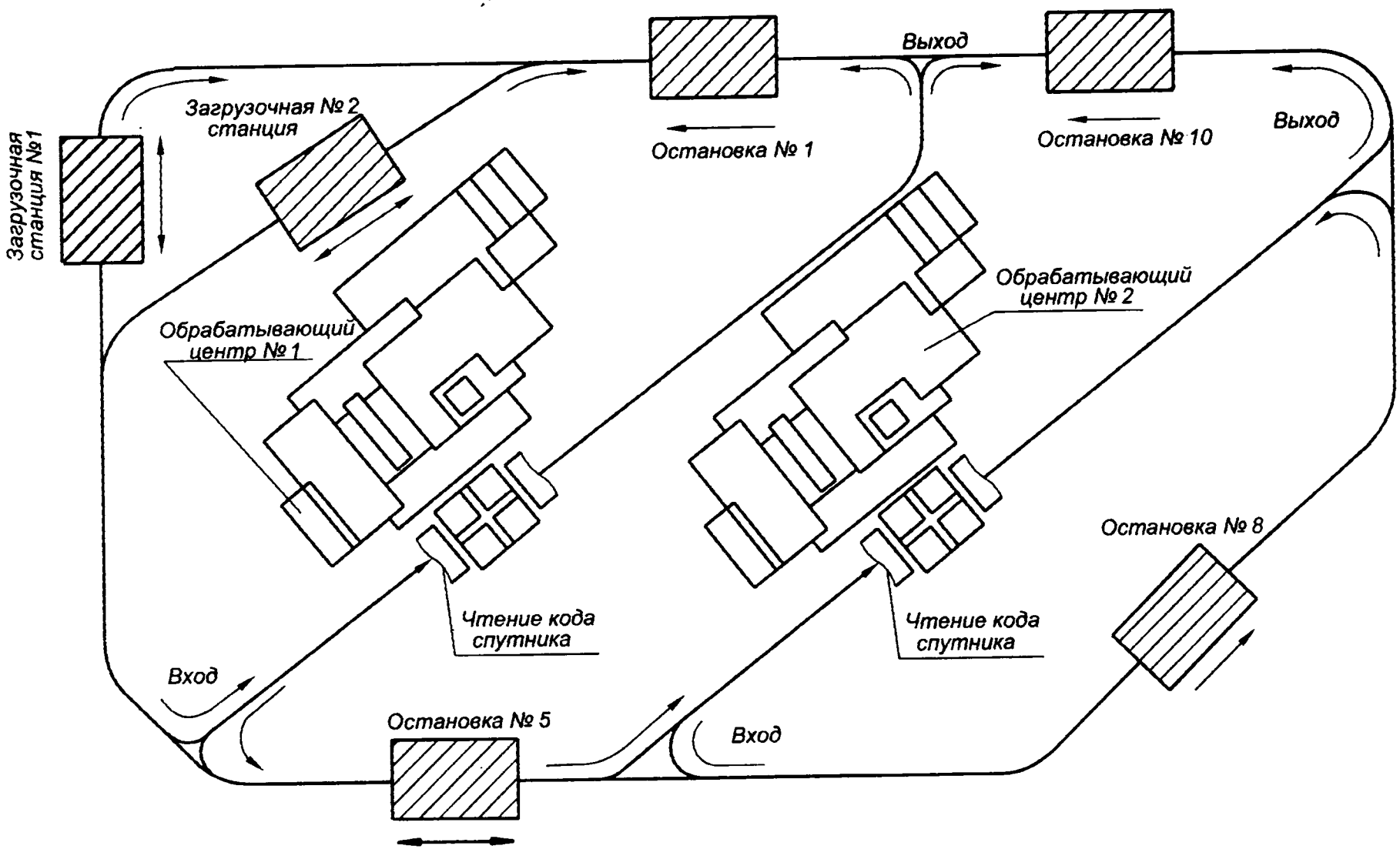


Рис. 4.1. Структура ГПС с двумя обрабатывающими центрами

В качестве его системы управления используют программируемые контроллеры, ЭВМ или же специализированные устройства.

Наиболее распространенные робокары с индуктивным маршрутослежением имеют следующие характеристики: грузоподъемность — 500 кг; скорость перемещения — 70 м/мин; ускорения при разгоне и торможении соответственно — 0,5 и 0,7 м/с^2; ускорение при аварийном торможении 2,5 м/с^2; величина подъема палеты — 130 мм; точность остановки робокара — 30 мм; время цикла перегрузки — 3 с; радиус поворота на максимальной скорости — 0,9 м; время работы без подзарядки аккумуляторов — 6 ч; напряжение аккумуляторной батареи — 24 В; мощность каждого из двух приводных двигателей — 600 Вт; собственная масса робокара — 425 кг.

Важным преимуществом робокаров как транспортных средств является отсутствие сколько-нибудь серьезных ограничений на расстановку оборудования, которая может быть осуществлена из соображений наибольшей эффективности по любым критериям. Маршрут робокаров нередко оказывается достаточно сложным, с параллельными ветвями и петлями (рис. 4.2 и 4.3).

Иногда в ГПС применяются все же не робокары, а транспортные средства со свободной адресацией кареток, несущих спутники. Пример компоновки гибкой системы с подобным видом транспорта показан на рис. 4.4. Управление этой транспортной системой осуществляется от программируемого контроллера или от ЭВМ.

Конструктивная модификация ГПС с линейным транспортом, кареткой свободной адресации и неподвижным общим накопителем палет показана на рис. 4.5. К транспортной системе подключают не только различное технологическое, но и вспомогательное оборудование, например моечную станцию.

Используется также конструктивная модификация (ГПС) с портальной системой транспортирования палет и с применением автооператора (рис. 4.6).

Более сложную структуру имеет ГПС в тех случаях, когда наряду с транспортным потоком деталей имеется еще и транспортный поток инструмента. Существует немало способов практической реализации такой структуры. Например, транспортирование деталей может осуществляться с помощью каретки свободной адресации, а доставка инструментальных наладок выполняется рельсовой тележкой, на которой смонтирован робот, играющий роль приемопередающего механизма (рис. 4.7).

На рис. 4.8 показано портальное трехкоординатное устройство для перегрузки инструментов из внешнего инструментального магазина в инструментальные магазины станков. Поток деталей между рабочими ячейками и центральным накопителем палет организован с помощью каретки свободной адресации. Наличие двух потоков усложняет структуру ГПС, но независимость этих

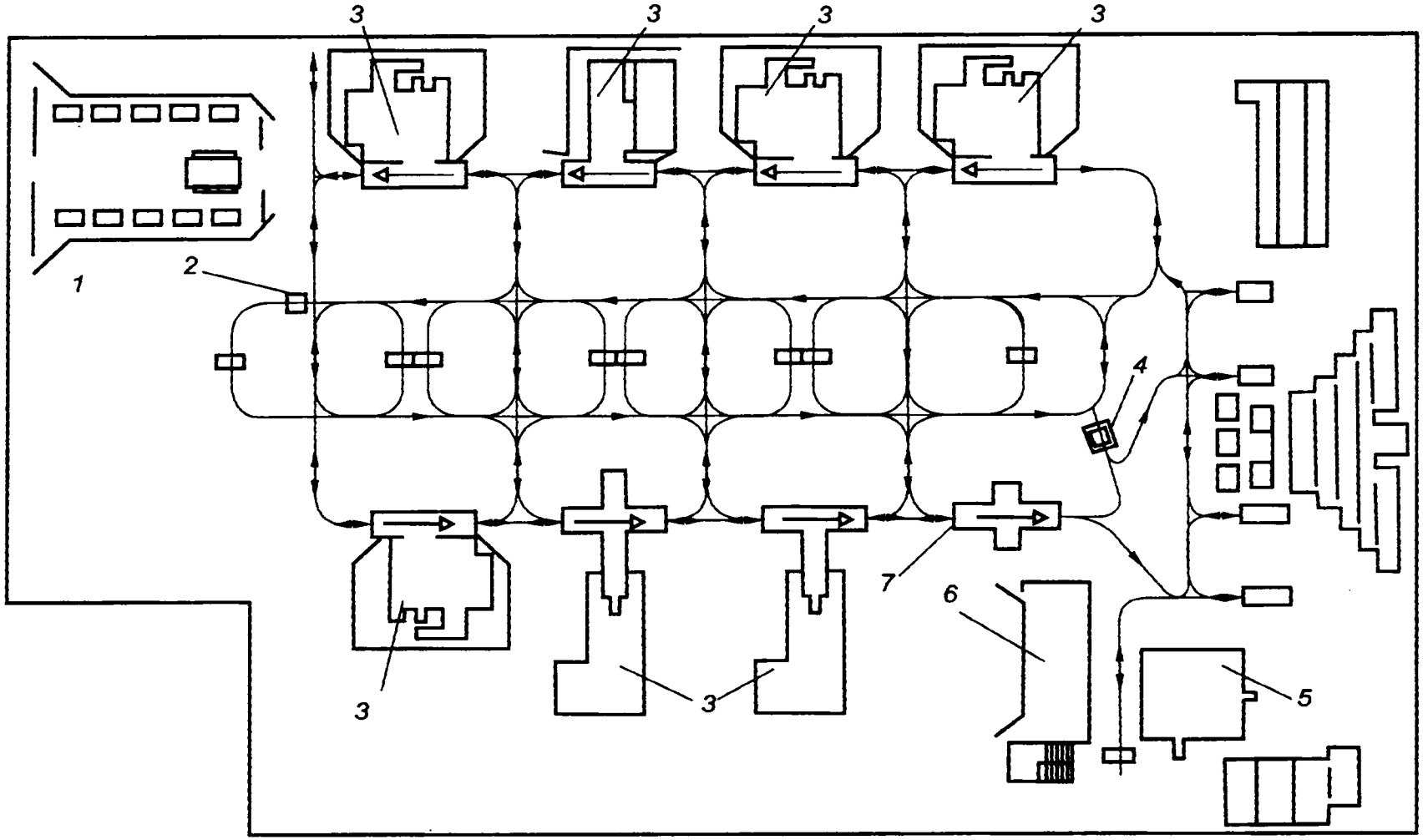


Рис. 4.2. Транспортные траектории робокаров:

1 — станция заряда аккумуляторов для робокаров; *2* — робокар; *3* — станки; *4* — робокар с палетой; *5* — окончательная промывка; *6* — центр управления; *7* — моечная машина

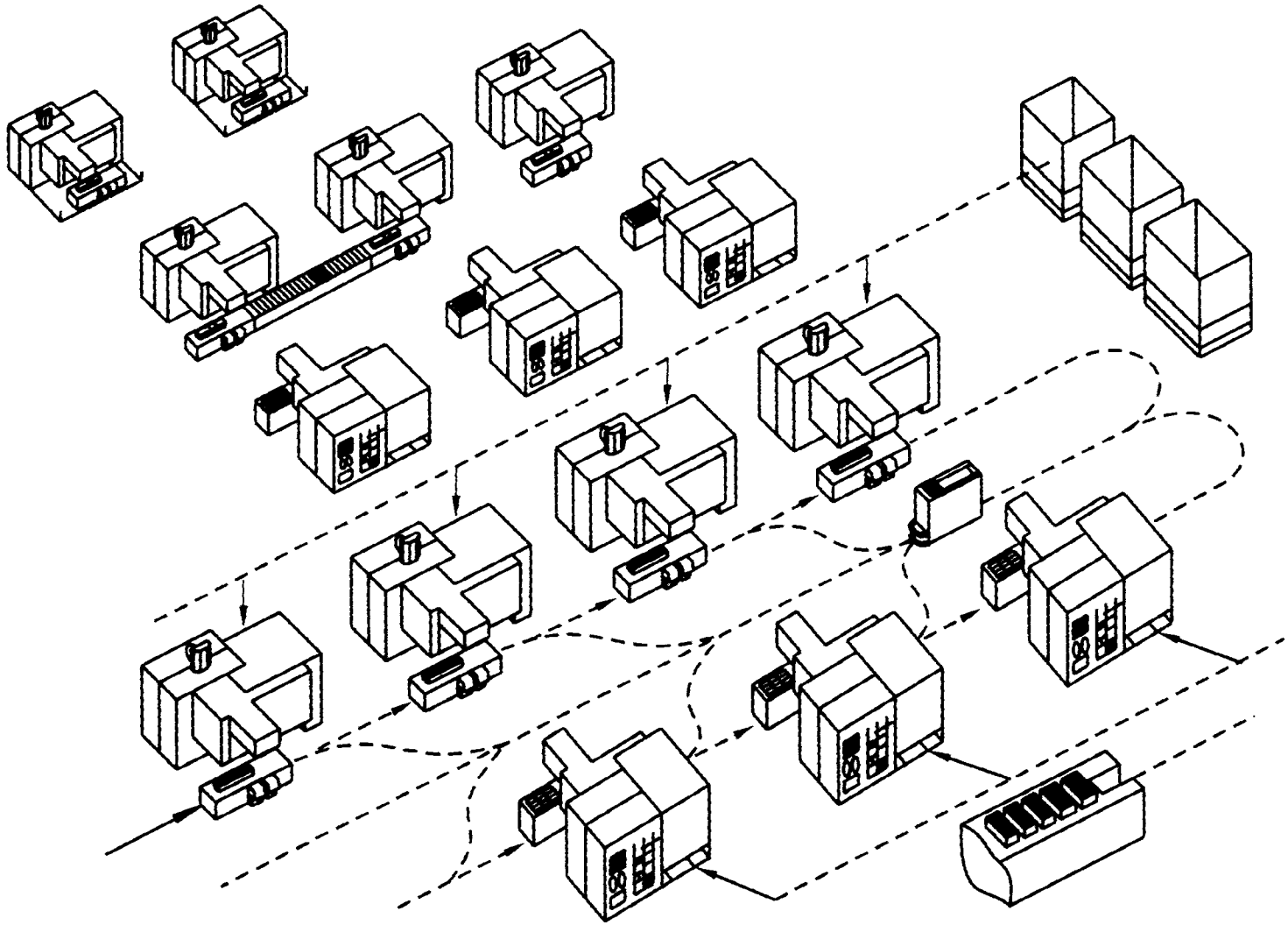


Рис. 4.3. Общий вид ГПС с робокаром

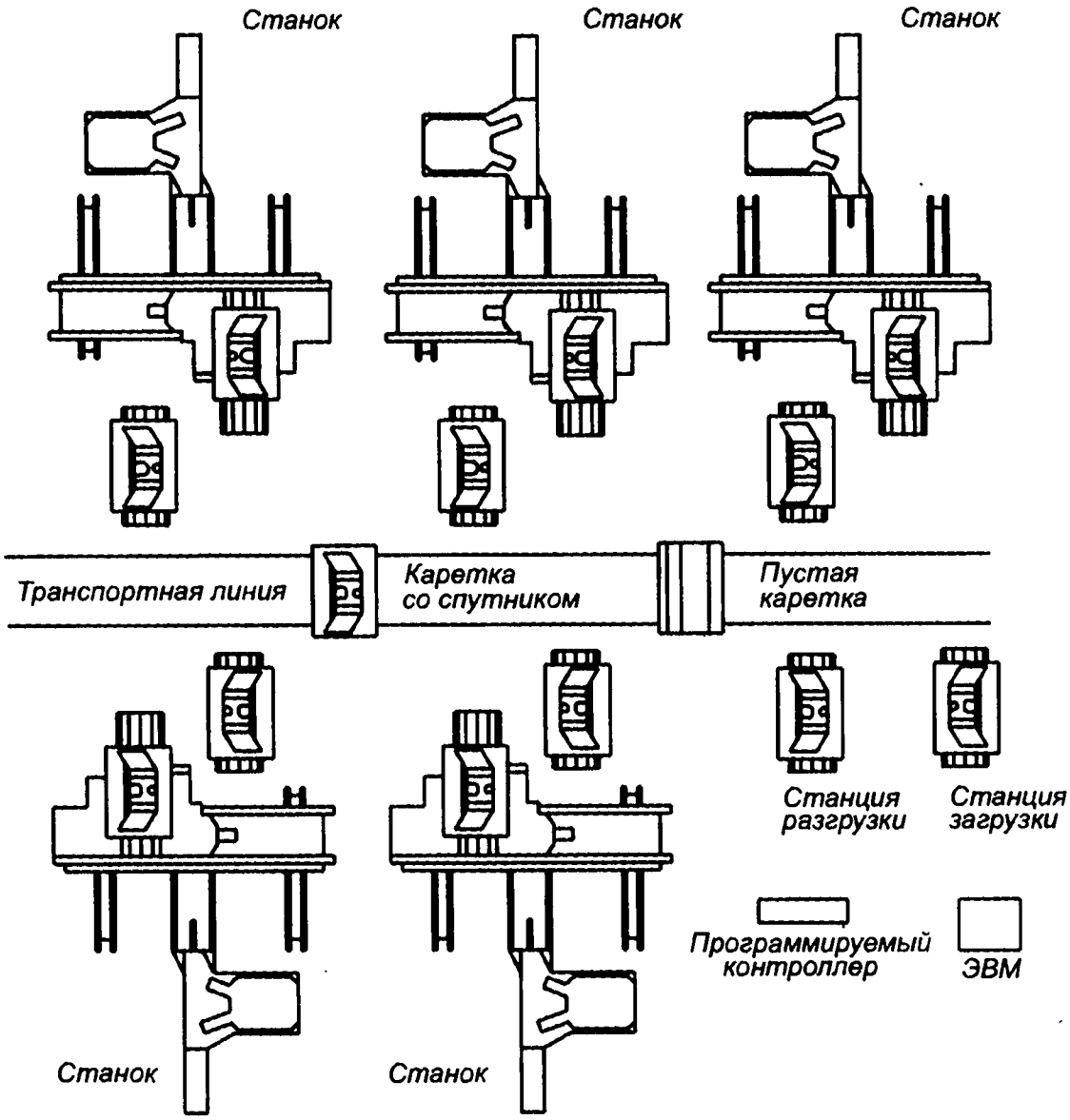


Рис. 4.4. Гибкая производственная система с каретками свободной адресации

потоков позволяет осуществлять оптимальное управление для каждого из них по отдельности.

Известны структурные решения с совмещением транспортных потоков деталей и инструментов. Например, робокар может доставлять к станкам и палеты с деталями, и инструментальные наладки (как показано на рис. 4.9). В таких структурах экономия транспортных средств может привести, однако, к задержкам в обслуживании станков и к усложнению управления.

Структурный анализ позволяет установить совокупность повторяющихся объектов в ГПС. К числу объектов, требующих как автономного управления, так и централизованной координации, прежде всего относятся ОЦ, а также накопители, транспортные средства, склады.

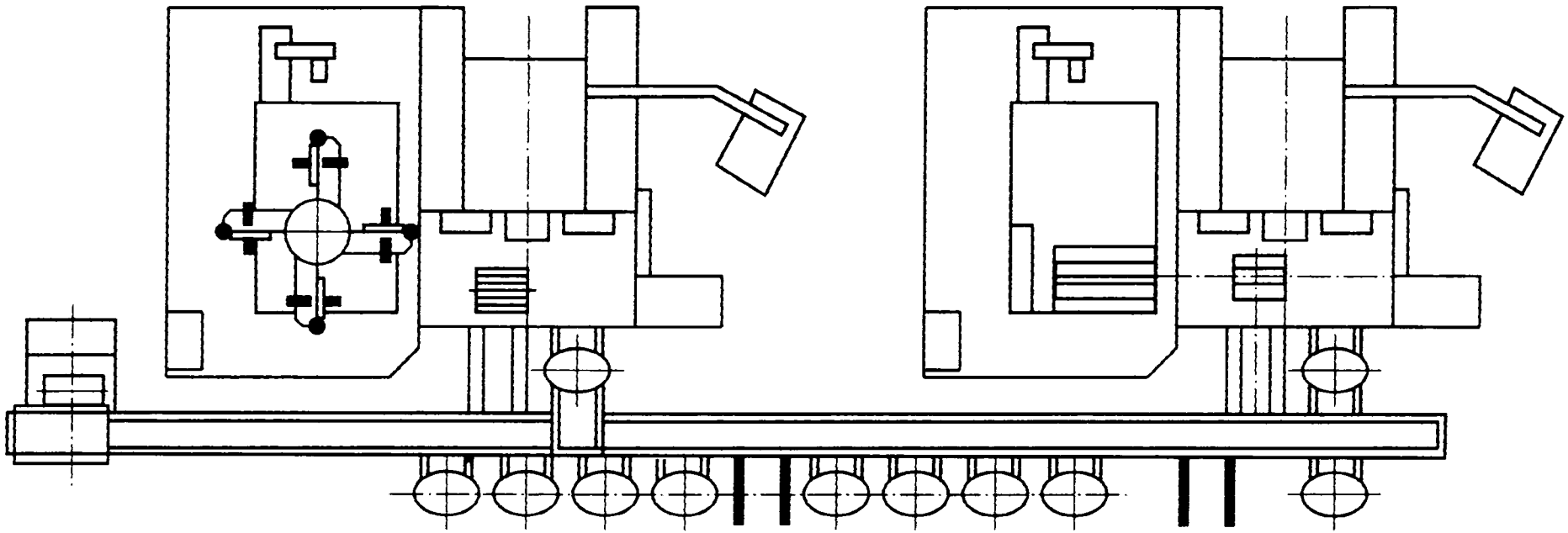


Рис. 4.5. Гибкая производственная ячейка ГПС с неподвижным накопителем и кареткой свободной адресации

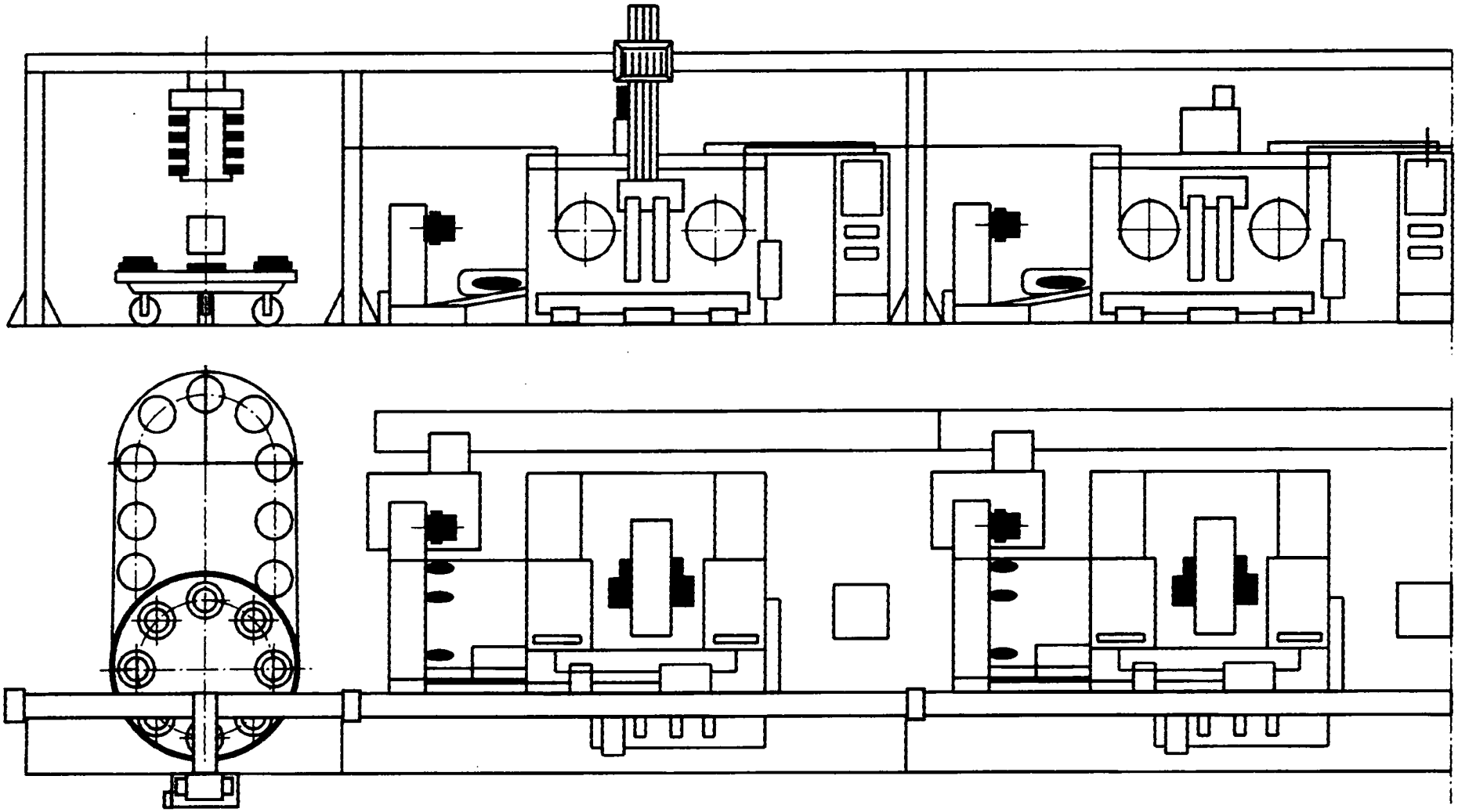


Рис. 4.6. Гибкая производственная ячейка ГПС с подвижным накопителем палет

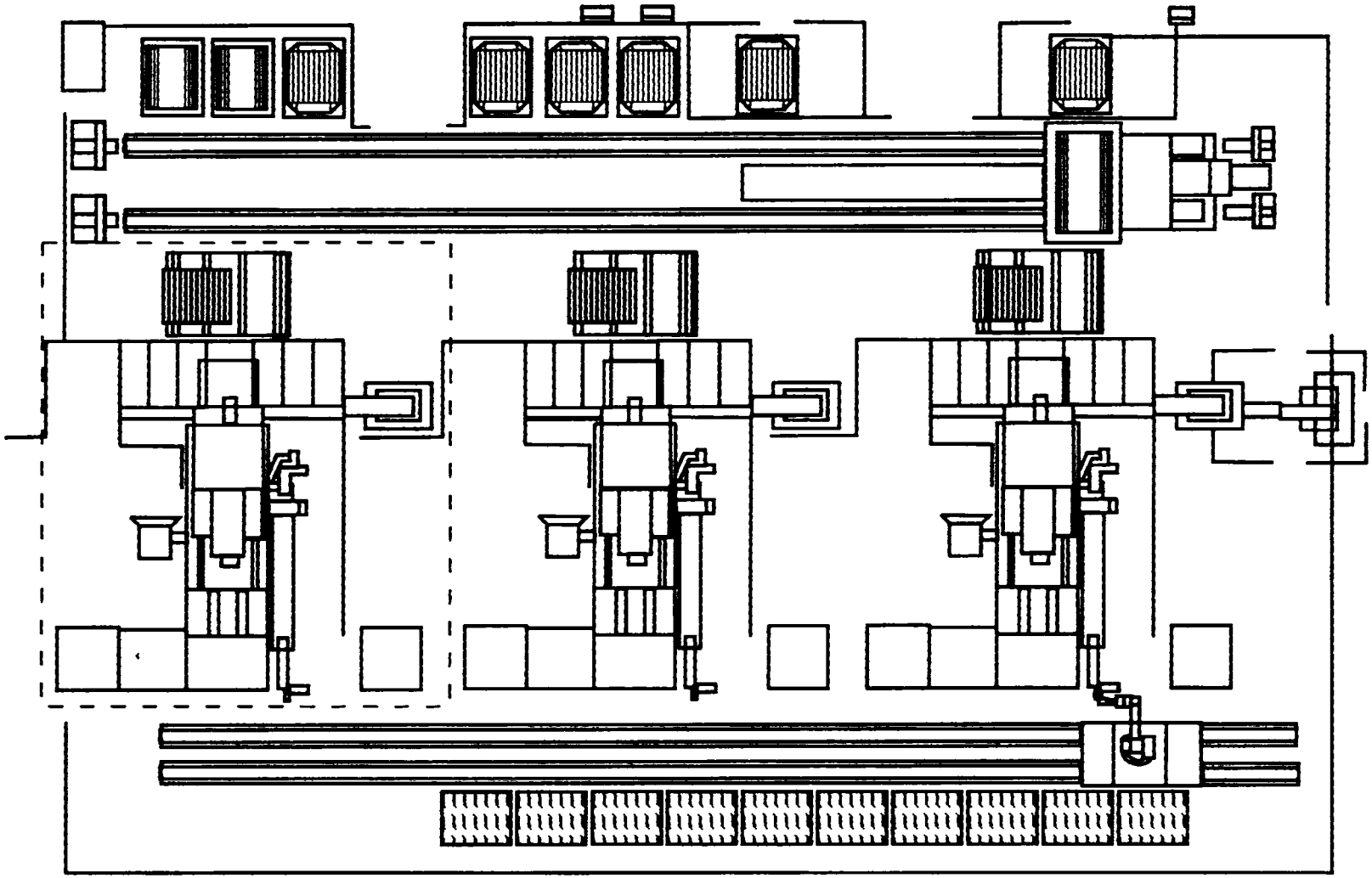


Рис. 4.7. ГПС с независимыми потоками для деталей и инструмента

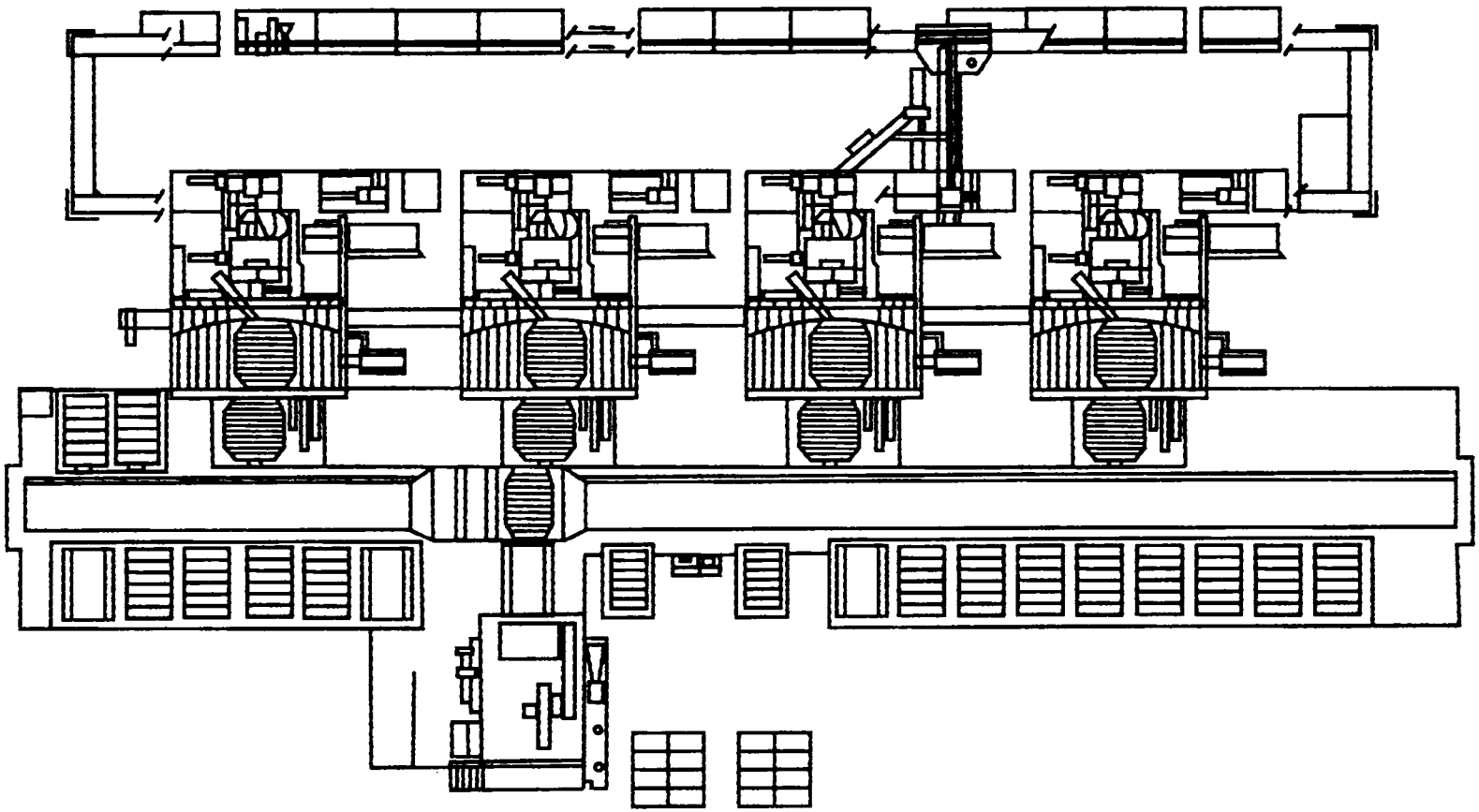


Рис. 4.8. ГПС с независимыми потоками для деталей и инструмента фирмы «Вернер унд Кольб»

Конструктивные особенности объектов должны быть ориентированы на взаимную интеграцию без доработок и переделок. В этом случае множественность указанных объектов составит семейство совместимых компонентов, способных порождать многочисленные варианты ГПС в соответствие с конкретным техническим заданием на их разработку.

Структуры гибкого многономенклатурного производства характеризуются составом или номенклатурой основного технологического оборудования и его количеством, которое зависит от программы выпуска и производительности, определяющих производственные связи между отдельными станками, ветвление и соединение потоков обрабатываемых деталей. Гибкое многономенклатурное производство является одной из разновидностей ГПС. Оно характеризуется движением деталей по произвольному маршруту с возможностью его прерывания, не требует обязательного выравнивания значений времени пребывания детали на различных операциях технологического маршрута и числа операций технологического маршрута для деталей разных наименований. Маршрут движения деталей и последовательность подачи их на обработку никак не связаны с компоновкой оборудования и определяются планом работы комплекса и расписанием загрузки единиц оборудования.

При формировании структуры такого производства учитываются порядок следований операций и их длительность. Разработку ГПС обычно осуществляют исходя из следующих условий:

- задано ли множество реализуемых производственных функций;
- заданы ли взаимосвязи между производственными функциями;
- заданы или же подлежат выбору элементы технических средств комплекса управления;
- учитывается или нет расположение элементов производственной системы;
- указаны или нет связи между элементами производственной системы;
- имеется или отсутствует возможность выполнения одной и той же задачи несколькими различными элементами.

Классификация операций производственных структур производится двояким образом.

1. По принципу назначения выделяются следующие операции:

- подготовка полных исходных данных по управлению складом заготовок;
- подготовка данных по маршруту транспортирования заготовок;
- управление складом инструментов;
- управление транспортировкой грузоединиц;
- управление оборудованием технологического процесса;
- управление складом готовых изделий.

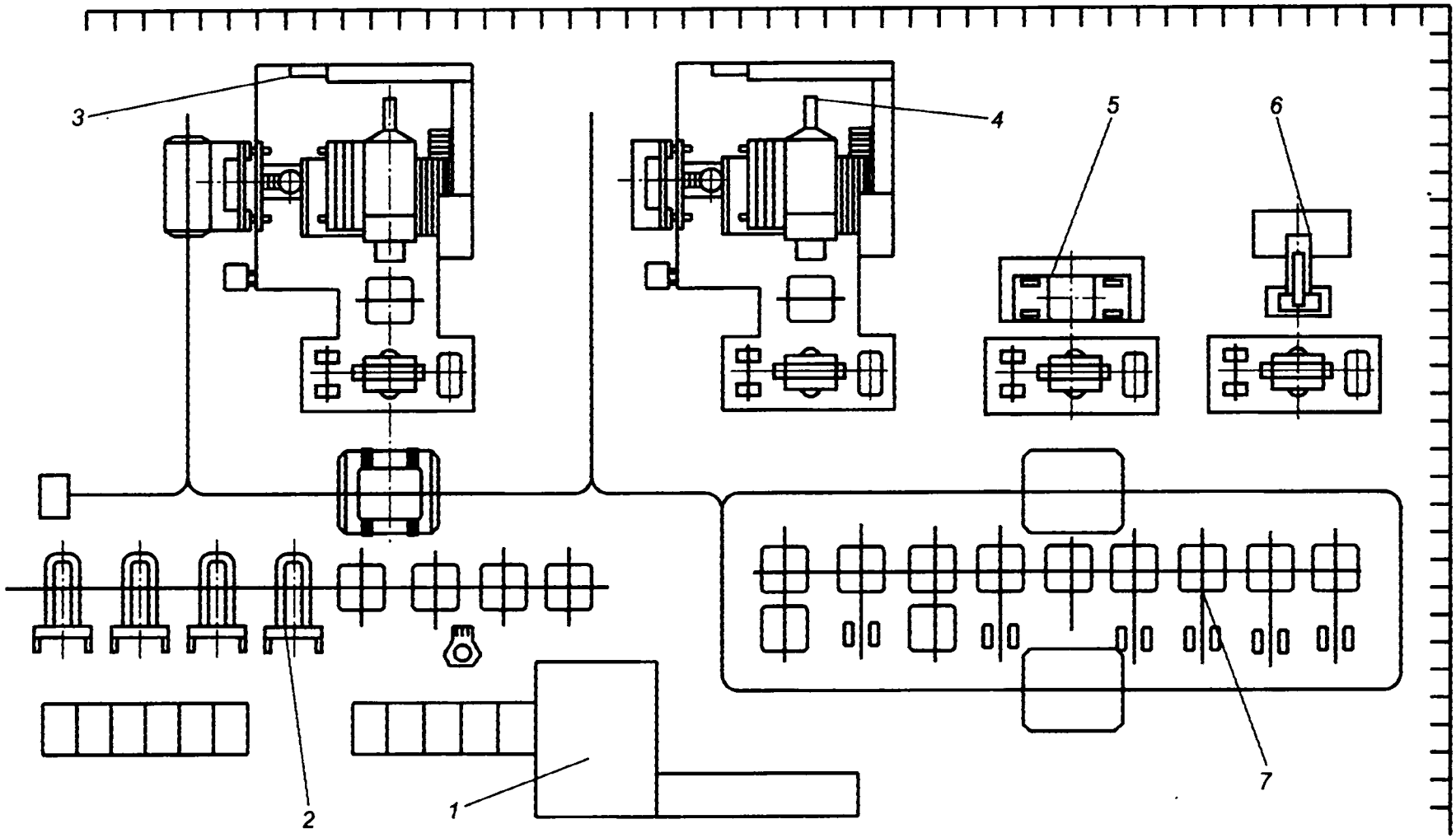


Рис. 4.9. ГПС на основе общего транспортирования едиными средствами деталей и инструментов:
1 — пункт управления; *2* — накопитель инструментальных наладок; *3* и *4* — станки с ЧПУ; *5* — моечная станция; *6* — контрольно-измерительная машина; *7* — накопитель палет

2. По принципу реализации производственного процесса различают операции:

- динамическое и статическое ведение состояния склада материалов;
- динамическое и статическое ведение состояния склада инструментов;
- осуществление транспортирования грузоединиц;
- составление полного отчета по состоянию технологического оборудования;
- отправка на склад готовых изделий.

Эффективность и производительность основного оборудования многономенклатурного производства непосредственно зависят от уровня его использования и загрузки.

Обеспечение загрузки оборудования в многономенклатурном производстве с учетом различной длительности производственных циклов на смежных технологических позициях является одной из центральных теоретических и практических проблем, с которыми приходится сталкиваться как при проектировании, так и при эксплуатации ГПС.

Загрузка оборудования ГПС в многономенклатурном производстве определяется планом. Различают объемные и календарные планы (расписания).

Первые устанавливают укрупненные балансы технологического времени по видам операций и фондов времени работы оборудования; вторые доводят объемные планы до регламентации временных технологических последовательностей выполнения работ на рабочих местах.

При проектировании ГПС многономенклатурного производства выбор производственных (и технологических) структур осуществляется только на основании объемных планов.

Расписание работы оборудования многономенклатурной ГПС создается в процессе эксплуатации с учетом реальной производственной ситуации.

Гибкие автоматизированные системы. По организационной структуре ГПС разделяются на следующие виды:

- гибкая автоматическая линия (ГАЛ) — гибкая производственная система, в которой технологическое оборудование располагается в принятой последовательности технологических операций;
- роботизированная технологическая линия (РТЛ) — совокупность роботизированных технологических комплексов, связанных между собой транспортными средствами и системой управления, или нескольких единиц оборудования, обслуживаемых одним или несколькими промышленными роботами для выполнения операций в принятой технологической последовательности;
- гибкий автоматизированный участок (ГАУ) — гибкая производственная система, функционирующая по технологическому

маршруту в соответствии с расписанием загрузки оборудования, в котором предусмотрена возможность изменения последовательности использования технологического оборудования;

• роботизированный технологический участок (РТУ) — совокупность единиц технологического оборудования, связанных между собой транспортными средствами и системой управления, или нескольких единиц технологического оборудования, обслуживаемых одним или несколькими промышленными роботами, в которой предусмотрена возможность изменения последовательности использования технологического оборудования;

• гибкий автоматизированный цех (ГАЦ) — гибкая производственная система, представляющая собой совокупность гибких автоматизированных линий, роботизированных технологических линий, гибких автоматизированных участков и роботизированных технологических участков, что обеспечивает возможность изготовления изделий заданной номенклатуры.

Основным элементом технологического оборудования, из которого строятся различные ГПС, являются роботизированные технологические комплексы (РТК) и гибкие производственные модули (ГПМ).

РТК — это совокупность, образованная единицей технологического оборудования, промышленным роботом и средствами пристаночного оснащения, автономно функционирующая и совершающая многократные технологические циклы.

ГПМ — это единица технологического оборудования с программным управлением и средствами автоматизации технологического процесса, автономно функционирующая, осуществляющая многократные технологические циклы, обладающая свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий различной номенклатуры (разумеется, в установленных пределах их типоразмеров и других технических характеристик), имеющая возможность встраивания в ГПС.

ГПС организуются преимущественно для комплексной обработки, обеспечивающей выпуск полностью обработанных деталей. Однако в ряде случаев отсутствует необходимый набор гибких производственных модулей для комплектования ГПС с полным циклом обработки деталей. В таких ситуациях, а также в силу специфических особенностей реализации технологических процессов на тех или иных предприятиях организуются ГПС с вынесением некоторых операций на другие производственные участки. Эти участки по сравнению с указанной ГПС могут иметь и более низкий уровень автоматизации. ГПС для предварительной обработки целесообразно объединять с переналаживаемыми комплексами резки заготовок и размещать в заготовительных цехах и производствах. По своей структуре ГПС разделяются на простые и сложные.

Простая ГПС — это производственная система, предназначенная для выполнения технологического процесса или его законченной в организационном отношении части. Она состоит из нескольких ГПМ, отдельных станков или РТК, объединенных автоматизированной транспортно-накопительной системой (ТНС) или транспортно-складской системой (ТСС).

Сложная ГПС — это гибкая производственная система, в состав которой входят единицы основного технологического оборудования (ГПМ, РТК или переналаживаемые станки), вспомогательное оборудование, система обеспечения функционирования производства (СОП) и управляюще-вычислительный комплекс (УВК). В состав сложной ГПС могут входить как простые ГПС, так и отдельные станки, например для подготовки баз и выполнения финишных операций; система обеспечения функционирования производства, включающая участки хранения и настройки инструмента, сборки приспособлений, мойки деталей, технического контроля, отделения для переукомплектования, установки и переустановки деталей; системы транспортирования и хранения деталей и инструментов, уборки отходов производства (в том числе стружки), подачи масла и эмульсии, а также ремонтные службы (в том числе занятые на работах по механике, гидропневмоавтоматике и гидропневмоприводу, электроприводу и электрике по электронике).

Рассмотрим это несколько подробнее.

Создание ГПС является неотъемлемой частью проектирования или реконструкции предприятия с учетом принципов группового производства. Всякая ГПС включает в себя два комплекса: производственный и управляюще-вычислительный. Заметим, что степень автоматизации и соответственно доля функций управления, возложенных на компьютерную управляюще-вычислительную систему, может быть различной. Однако все необходимые для данной производственной системы функции управления должны выполняться. Часть этих функций выполняется компьютерным комплексом, а часть — управляющим персоналом. Таким образом, система управления ГПС в общем случае представляет собой человекомашинный комплекс.

Производственный комплекс включает в себя собственно производственную систему и систему обеспечения функционирования производством (СОП).

В общем случае в систему обеспечения производства входят:

- автоматизированная транспортная и транспортно-складская система (АТСС);
- автоматизированная система инструментального обеспечения (АСИО);
- система автоматизированного контроля (САК);
- система автоматизированного удаления отходов (АСУО);

• система обеспечения профилактики и ремонта оборудования (СПР);

• система автоматизированного проектирования, конструкторского и технологического (САПР-К и САПР-Т);

• автоматизированная система технологической подготовки производства (АС ТПП);

• автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП);

• автоматизированная система управления гибкой производственной системой (АСУ ГПС) и некоторые другие системы.

Состав оборудования для ГПС, а также состав, функции и оборудование интегрированной системы обеспечения функционирования производства определяются исходя из конкретной производственной ситуации на том предприятии, где предполагается организовать ГПС, а также из возможностей и экономической эффективности поставок перспективного оборудования (рис. 4.10). При организации гибких автоматизированных участков по структурным схемам *1.1*, *1.2*, *1.3*, *1.4*, *1.5* и *1.8* система обеспечения функционирования производства оказывается вынесенной за пределы участка, а накопители размещаются на площади самого этого участка.

При организации цеховых ГПС с применением структур в соответствии со схемами *1.6* и *1.7* все системы, как и все технологическое оборудование, размещаются на площадях, отводимых непосредственно под ГПС. Реализация ГПС по схеме *1.1* рекомендуется для одностороннего расположения станков, а по схемам *1.2* и *1.6* — для двустороннего расположения. Для перемещения и складирования заготовок, деталей, инструмента и приспособлений применяются транспортные роботы, которые позволяют устанавливать тару, поддоны и сменные приспособления-спутники (палеты) на приемные устройства и накопители отдельных станков и в общеучастковые накопители. При организации ГПС по схемам *1.3*, *1.4* и *1.7* транспортные роботы обеспечивают перемещение и накопление деталей на одном уровне высот. Для размещения оборотных заделов, инструмента и приспособлений, предназначенных для последующей механической обработки, используются механические накопители-подъемники. Подобные схемы могут применяться как для одностороннего, так и для двустороннего расположения станков. Схема *1.5* применяется для таких ГПС, у которых предусматривается организация общего склада-накопителя. Для загрузки станков транспортный робот захватывает тару или спутник из стеллажа-накопителя и устанавливает на локальный накопитель или же на пристаночное загрузочно-разгрузочное устройство. При использовании структуры по схеме *1.8* в одном транспортном блоке применяется перемещение по двум уровням. На верхнем уровне перемещается устройство циклического

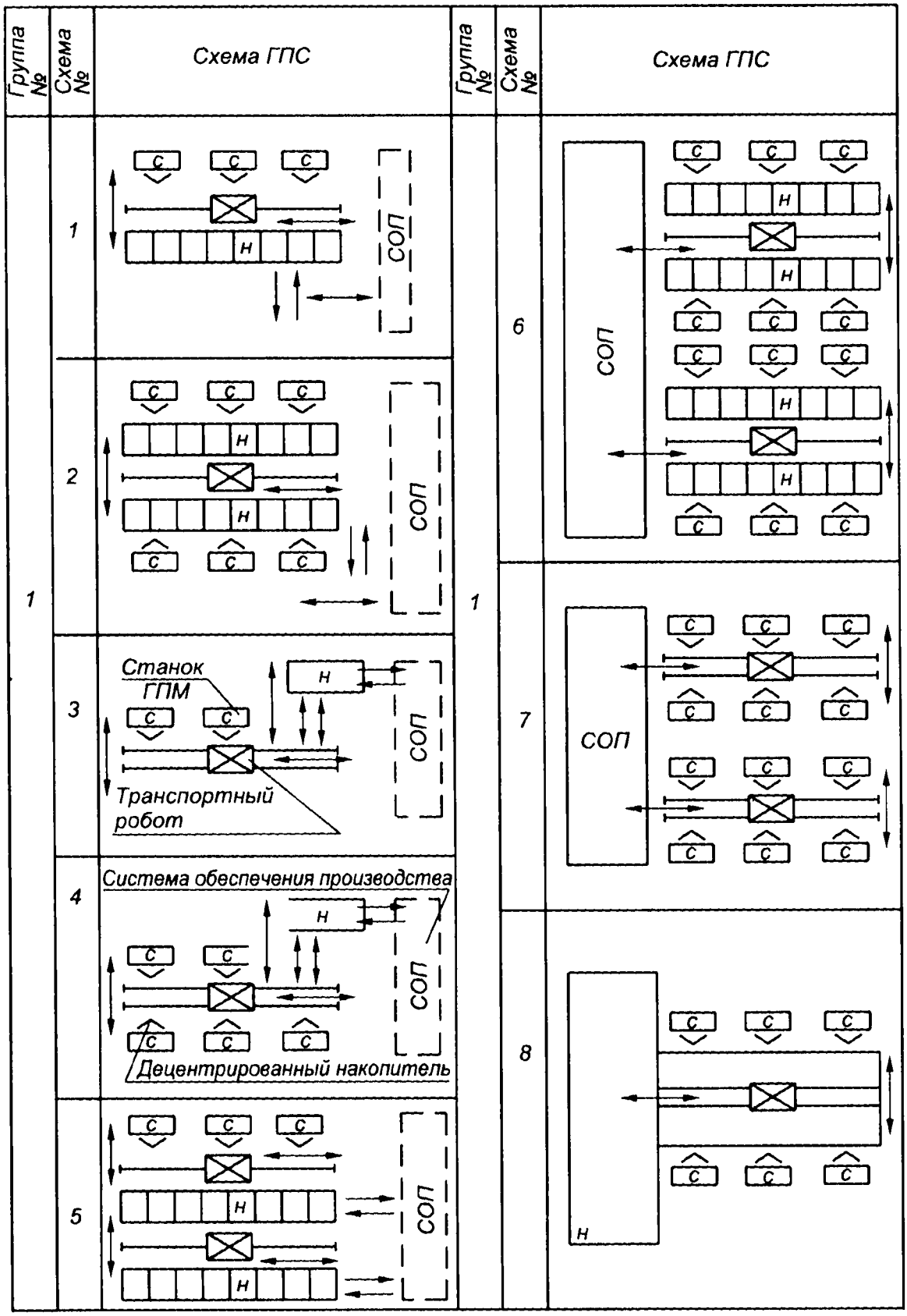


Рис. 4.10. Структурные схемы организации гибких автоматизированных участков:

с — станок с пристаночной механизацией; *н* — накопитель; *СОП* — система обеспечения производства

действия, транспортирующее тару, поддоны и спутники к рабочим местам. На нижнем уровне осуществляется возврат тары, поддонов и спутников от рабочих мест после каждой технологической операции. Обычно для выполнения операций по возврату используется роликовый приводной конвейер.

Кроме указанных, возможны и иные схемы компоновок ГПС, использующие роликовые конвейеры в сочетании с различными поворотными и подъемными устройствами, а также с цепенесу-

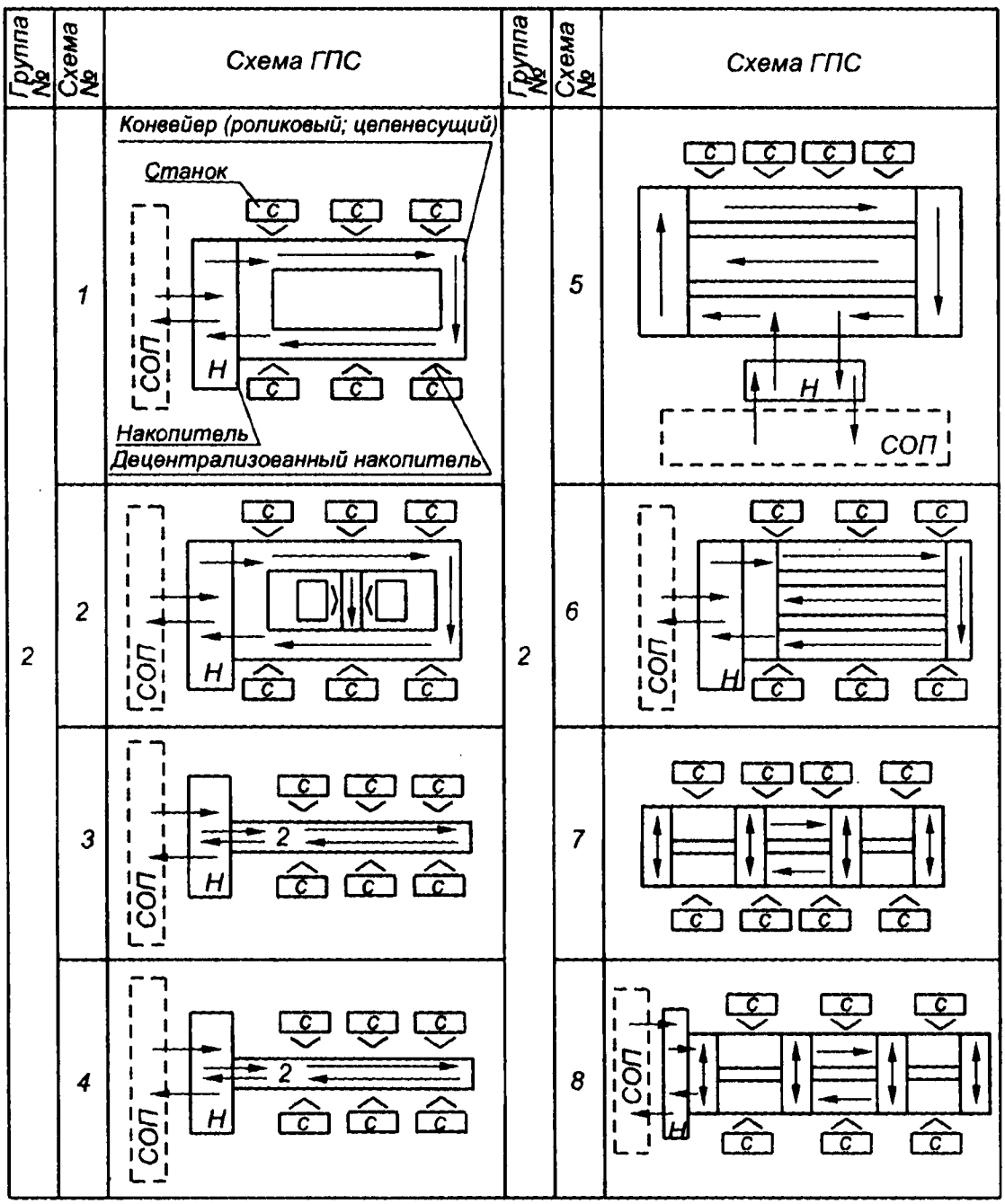


Рис. 4.11. Структурные схемы компоновок ГПС с использованием поворотных и подъемных устройств (условные обозначения те же, что и на рис. 4.10)

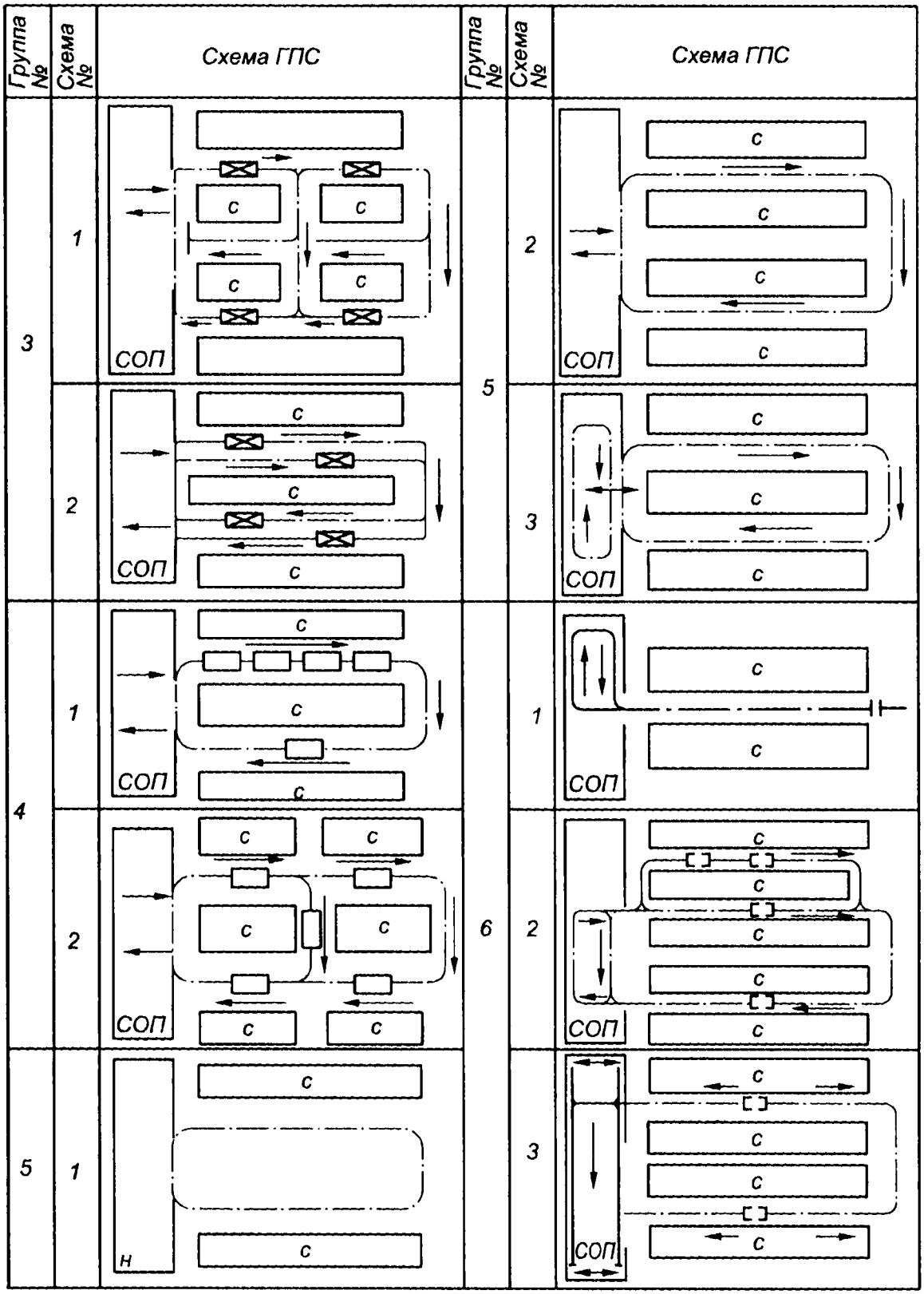


Рис. 4.12. Структурные схемы ГПС с перемещением транспортных устройств по специальным проездам:

С — зона расположения станков с пристаночной механизацией и накопителями; *СОП* — службы системы обеспечения функционирования производства; ⊠ — транспортный робот напольный, подвижный состав монорельсовых дорог; ▭ — тележка напольная, —·— — конвейер подвесной

щими конвейерами. Различные схемы таких устройств приведены на рис. 4.11. Вдоль линейной или замкнутой трассы конвейеров могут разместиться до 25 станков, а также общеучастковые накопители. Система обеспечения функционирования производства вынесена за пределы участка.

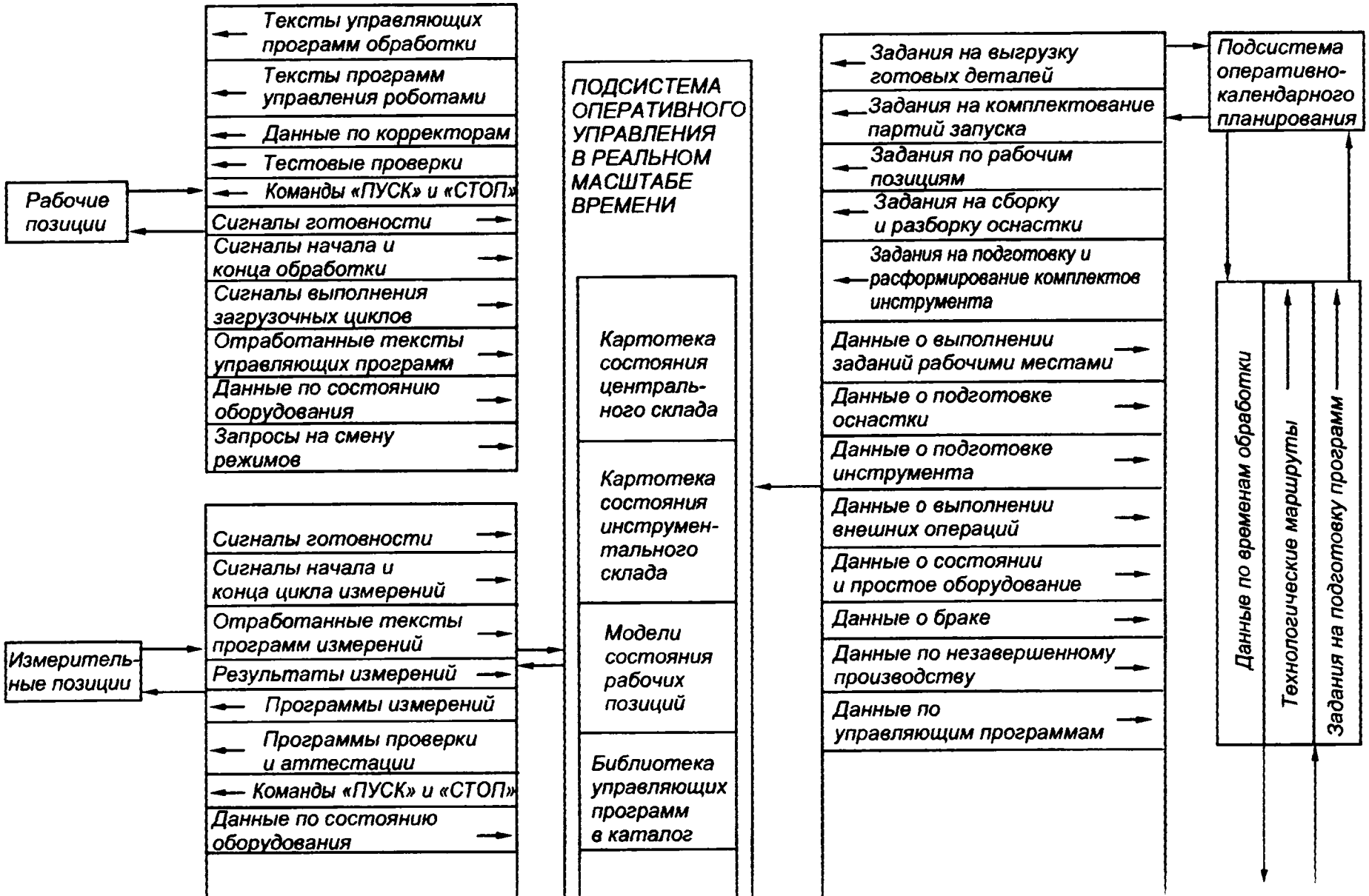
Наконец, практически применяются ГПС, использующие для межоперационных перемещений напольные рельсовые транспортные устройства, а также безрельсовые устройства без водителей, перемещающиеся по специальным проездам. Количество установленных станков определяется размерами выпуска. Использование подобных схем целесообразно для производственных участков, в которых станки располагаются группами разнообразной конфигурации и требуется создание криволинейных трасс для межоперационных перемещений, а также в тех случаях, когда различные склады и участки подготовки производства размещаются в отдалении от технологического оборудования. Транспортные трассы в таких случаях обычно бывают закольцованы.

Различные варианты подобных структур ГПС приведены на рис. 4.12.

Система управления ГПС относится к многоуровневым иерархическим системам управления. Для иерархических систем характерно то, что информационно-управляющее взаимодействие происходит только между расположенными рядом уровнями иерархии управления. Например, третий уровень управления не может передавать управляющие воздействия на первый уровень управления, минуя второй. В случае структур ГПС к нижнему уровню управления относятся устройства числового программного управления отдельными станками, устройства управления краном-штабелером и отдельными устройствами, входящими в транспортно-складскую систему. Средний уровень системы управления ГПС обеспечивает прием плановых заданий от верхнего уровня системы управления (независимо от того, составляются эти плановые задания с помощью компьютерных систем или же человеком), автоматизацию оперативного управления централизованными службами обеспечения производства, координирует работу систем нижнего уровня. Наконец, на верхнем уровне управления ГПС производится разработка плановых и директивных документов (или массивов), определяющих функционирование данной ГПС в течение рассматриваемого временного интервала.

Информационной базой для управления ГПС является компьютерная модель, отражающая состояние этой ГПС и включающая модель склада-накопителя, транспортно-накопительной системы и пунктов загрузки-выгрузки.

Основные задачи компьютерной техники при управлении ГПС следующие:


Тексты управляющих программ обработки
Тексты программ управления роботами
Данные по корректорам
Тестовые проверки
Команды «ПУСК» и «СТОП»
Рабочие позиции
Сигналы готовности
Сигналы начала и конца обработки
Сигналы выполнения загрузочных циклов
Отработанные тексты управляющих программ
Данные по состоянию оборудования
Запросы на смену режимов
Сигналы готовности
Сигналы начала и конца цикла измерений
Отработанные тексты программ измерений
Измерительные позиции
Результаты измерений
Программы измерений
Программы проверки и аттестации
Команды «ПУСК» и «СТОП»
Данные по состоянию оборудования
ПОДСИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ
Картотека состояния центрального склада
Картотека состояния инструментального склада
Модели состояния рабочих позиций
Библиотека управляющих программ в каталог
Задания на выгрузку готовых деталей
Задания на комплектование партий запуска
Задания по рабочим позициям
Задания на сборку и разборку оснастки
Задания на подготовку и расформирование комплектов инструмента
Данные о выполнении заданий рабочими местами
Данные о подготовке оснастки
Данные о подготовке инструмента
Данные о выполнении внешних операций
Данные о состоянии и простое оборудование
Данные о браке
Данные по незавершенному производству
Данные по управляющим программам
Подсистема оперативно-календарного планирования
Данные по временам обработки
Технологические маршруты
Задания на подготовку программ

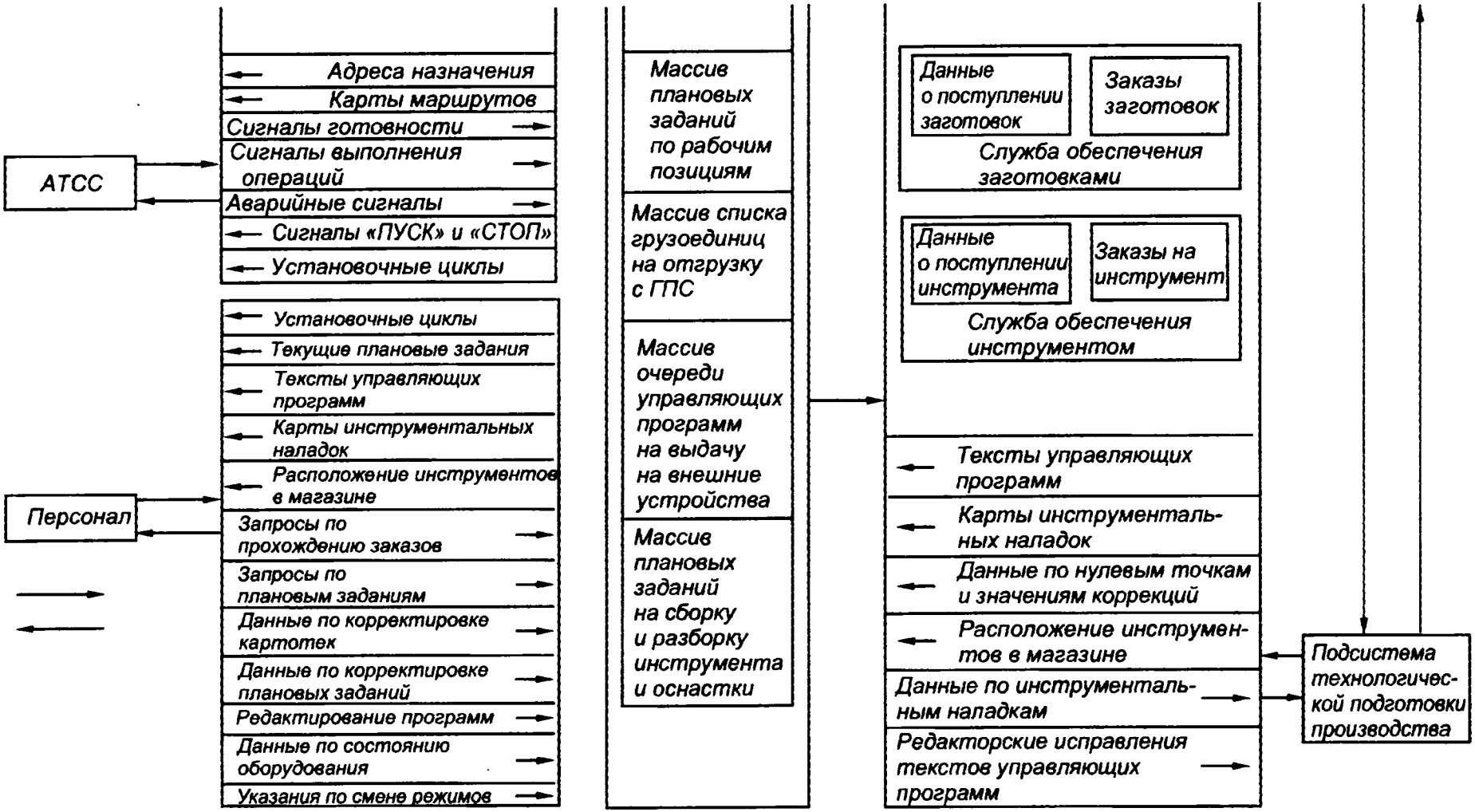


Рис. 4.13. Структура информационного обмена между функциональными подсистемами ГПС

• оперативно-календарное планирование производства, включая подетальное планирование на месяц, расчет сменно-суточного задания, расчет подетально-операционного плана на заданный период времени, отображение, контроль и коррекция сменно-суточных заданий, формирование партий запуска и выпуска, расчет загрузки оборудования;

• технологическая подготовка производства, включая планирование и учет комплектования ГПС инструментом, оснасткой и управляющими программами на заданный календарный период, планирование обеспечения ГПС заготовками, разработку карт наладок и укомплектовочных карт инструмента, автоматизацию разработки технологических процессов и управляющих программ для станков с ЧПУ;

• оперативное управление и ведение отчетности, включая выполнение сменно-суточных заданий, комплектование заказов, обеспечение заготовками, запуск деталей в обработку и их движение, возникновение брака, поступление и местонахождение грузоединиц в складах-накопителях, работу и простой оборудования;

• технико-экономическое планирование и учет, включая учет выполнения производственной программы за сутки, смену и с начала месяца, расчет плана технико-экономических показателей ГПС и учет его выполнения;

• информационное взаимодействие, диагностику и непосредственное управление оборудованием ГПС.

Структура информационного обмена между функциональными подсистемами, входящими в систему управления гибким многономенклатурным производством, приведена на рис. 4.13.

4.3. Гибкие производственные системы с применением промышленных роботов

Мировой тенденцией, преобладающей в настоящее время, является снижение серийности и масштабов выпуска изделий при расширении их номенклатуры. Этим обеспечивается возможность гибко реагировать на изменения спроса и реально поступающих заказов. Традиционным методом балансировки производства и спроса было создание запасов готовой продукции определенного ассортимента. Однако этот метод в условиях возрастающего разнообразия потребностей покупателей перестает быть удовлетворительным. Наличие значительных запасов готовой продукции, создаваемых «на всякий случай», означает омертвление значительного капитала и выведение его из оборота. Создание таких запасов делает предприятие консервативным, и не производится то, что можно продать, а наоборот, продается то, что было произведено.

Поэтому современной тенденцией является придание производству способности оперативно реагировать на колебания спроса без создания значительных запасов готовой продукции.

Во всех типах производств над заготовкой с момента ее поступления на склад предприятия и до выдачи готовой детали на сборку (или на выходной склад готовых деталей) выполняется ряд операций на основном технологическом оборудовании, а также производится целый ряд вспомогательных операций. При этом лицо, занимающееся организацией производства и управлением технологическим процессом, не имеет права нарушать технологическую дисциплину, т.е. без согласования с технологом изменять последовательность выполнения операций, предусмотренных технологическим маршрутом или менять параметры этих операций. В зависимости от сложности и уровня автоматизации производственной системы упомянутые вспомогательные операции выполняются либо вручную, либо с помощью различных механизмов, либо при том или ином сочетании действий оператора и работы механизмов.

В области крупносерийного и массового производства с успехом применяются гибкие переналаживаемые линии (ГПЛ), обслуживаемые роботами. Наиболее часто промышленные роботы применяются здесь для выполнения операций загрузки и выгрузки на начальных и конечных позициях линий в целом и на технологически и конструктивно законченных участках линий. В этом случае решается задача переналадки линий на обработку часто сменяемой продукции.

Промышленные роботы применяются также для загрузки, разгрузки и других видов обслуживания агрегатных станков. В этом случае минимальная технологическая ячейка обычно состоит из 2—3 станков и промышленные роботы применяются для установки и снятия деталей, а также для их межстаночного проектирования.

В мелкосерийном и серийном производствах промышленные роботы используются обычно в сочетании со станками с ЧПУ. Это позволяет автоматизировать групповую обработку мелких серий деталей, выполняя следующие операции:

установку и снятие детали на станке;

очистку баз станка и детали;

контроль правильности базирования заготовки на столе, в патроне и в центрах;

контроль деталей, прошедших обработку;

смену, установ и контроль режущего инструмента на станке;

выборку и раскладку деталей, установленных с соответствующей ориентацией в специальной таре (например, в кассетах);

установку, складирование и штабелирование деталей или специальной тары;

обслуживание автоматизированных и механизированных складов;

транспортирование деталей или специальной тары (например, кассет или палет) от станка к станку;

внутрицеховое транспортирование;

загрузку и разгрузку различного вида транспортеров;

консервацию и упаковку деталей;

выполнение заданной последовательности обслуживания станков в группе.

С помощью промышленных роботов (специальных, специализированных и целевых) можно автоматизировать операции по загрузке и разгрузке деталей, если конструкция этих деталей удовлетворяет следующим требованиям:

детали имеют однородные по форме и расположению поверхности для захвата и базирования, позволяющие устанавливать их на станок без дополнительной выверки;

детали имеют ясно выраженные конструктивные и технологические базы и признаки ориентации, которые позволяют осуществлять их транспортирование и складирование ориентированно либо в специальных тарах, поддонах, кассетах и т. п.;

конструктивно-технологические параметры деталей позволяют применять принципы групповой обработки;

масса деталей находится в пределах 10... 500 кг. Детали меньшего веса можно загружать стандартными устройствами типа вибробункеров. Зачастую также ручная загрузка и выгрузка таких небольших деталей оказывается более простой и эффективной, чем при использовании промышленных роботов. Для деталей массой более 500 кг необходимо создавать и использовать роботы специальной конструкции.

Возможные сочетания промышленных роботов различной грузоподъемности с отечественными станками различных марок и различных типоразмеров приведены в табл. 4.4.

Выполнение вспомогательных операций для деталей сложных конфигураций, отличающихся формами базовых поверхностей, таких как вилки, рычаги, кулисы, сложные корпуса и т. п., в условиях многономенклатурной обработки требует специальных установочных, фиксирующих и захватных устройств.

Для успешного внедрения роботов в производственные системы вводятся необходимые изменения в конструкцию технологического и вспомогательного оборудования, разрабатываются вспомогательные устройства, расширяющие функции промышленных роботов, соответствующие транспортные системы, создается оптимальная компоновка участка станков, реорганизуются его связи с остальным производством. Вносятся также необходимые и допустимые изменения в конструкцию деталей, с которыми работает робот.

Станки, ориентированные на работу совместно с промышленным роботом, обладают следующими особенностями:

система управления робота должна быть связана с системой управления станка, чтобы преобразовывать и передавать на исполнение различные технологические команды, например зажим или разжим патрона либо центров, включение станка и т.д.;

зажим детали в патроне (для деталей типа фланцев), захват детали поводком (для деталей типа валов), фиксация и зажим детали на рабочем столе станка (для фрезерных и тому подобных станков) осуществляются автоматически. Автоматизируется также поджим заготовки к торцу патрона либо задней бабкой, либо специальным устройством для поджима на револьверной головке или на суппорте станка;

автоматизируется перемещение (открывание и закрывание) щитков ограждения рабочей зоны станка;

для расширения технологических возможностей станка токарные станки патронного типа в некоторых случаях оснащаются устройствами автоматической фиксации шпинделя в определенном угловом положении;

в станках, предназначенных для работы совместно с роботом, предусматривается особо низкая частота вращения шпинделя, что необходимо для контроля биения заготовки. Такие станки снабжаются устройствами для дробления стружки с целью обеспечить отвод стружки из зоны резания;

доступ в рабочую зону сверху или с тыльной стороны станка является свободным для наблюдения рабочего за работой станка и робота.

Для эффективности применения промышленных роботов в составе производственных систем используется специально созданное для этих целей вспомогательное оборудование и оснастка: магазины, спутники, накопители, специализированная тара, наборы захватов. Уже на стадии разработки технологического процесса следует решать вопросы ориентирования деталей, чтобы избежать затрат на последующее создание специальных ориентирующих устройств. Например, технологический процесс должен быть таким, чтобы на позицию загрузки заготовка приходила ориентированной в то положение, которое она должна иметь на первой операции. Для типовых деталей, таких как валы, зубчатые колеса, фланцы, кольца, крышки, планки, рычаги и др., разрабатывается специальная легкопереналаживаемая тара.

Планировка производственного участка во многом определяется конструкцией промышленного робота. Например, для стационарного робота с шарнирной рукой станки целесообразно располагать зонами обслуживания друг к другу. Для промышленных роботов применяется круговая компоновка производственного участка. При этом, однако, одним роботом обслуживается

Таблица 4.4

Станки						Применяемость ПР грузоподъемностью, кг					
Группа				Модель	Характеристика	20	40	80	160	250	500
1	Токарные	центровые		1713Ц (Ф3) (МФ3)	Ду = 400	/	\	×			
				1708Ц	400	/	\	×			
				1716Ц (Ф3)	400	/	\	×			
				1725Ц	500		/	\	×		
				1725Ф3	500		/	\	×		
				1725МФ3	500		/	\	×		
				16732Ф3	630		/	\	×		
				16732МФ3	630		/	\	×		
		патронные	горизонтальные	1П717Ф3	320	/	\	×			
				16Б16Ф3	320	\	×				
				КТ-141	400		/	\	×		
				1725Ц (Ф3) (МФ3)	500			/	\	×	
				1П752МФ3	500			/	\	×	
				1П426Ц (Ф3)	500			/	\	×	
				Р1725Ф3	630			/	\	×	
				1П732Ф4	630				/	\	×
				1П732МФ3	630				/	\	×
				1П732Ф3	630				/	\	×

1	Токарные	патронные	вертикальные	1723Ф3	200	\	×				
				1734Ф3	320	/	\	×			
				1751Ф3	Ду = 500 мм			/	\	×	
2	Фрезерные	вертикальные		6520РФ3	250×630*	\	×				
				6540РФ3	400×1000	/	\		×		
				654РФ3	400×1600	/	\		×		
				16732Ф3	630×1600	/		\		×	
		горизонтальные		6904ПМФ4	400×500	/	\	×			
				6906МФ4	630×800	/		\	×		
				6306МФ4	400×1600	/		\		×	
		универсальные		6А76ПМФ2	250×630	\	×				
	Сверлильные			2М118Ф2	18**	\	×				
				2Р118Ф2	18			/	\	×	
				2Н135Ф2	35	/		\	×		
				2Р135Ф2	35	/		\	×		
ВСЕГО:						19	22	21	19	10	3
в том числе станков:											
1-й группы						5	11	14	13	7	3
2-й группы						14	11	7	6	3	—

Примечание. * — размер стола, мм; ** — условный максимальный диаметр сверла, мм; × — требуемая грузоподъемность ПР для обслуживания всех деталей, обрабатываемых на станке; \ — требуемая грузоподъемность ПР для обслуживания 80 % деталей; / — требуемая грузоподъемность ПР для обслуживания 60 % деталей.

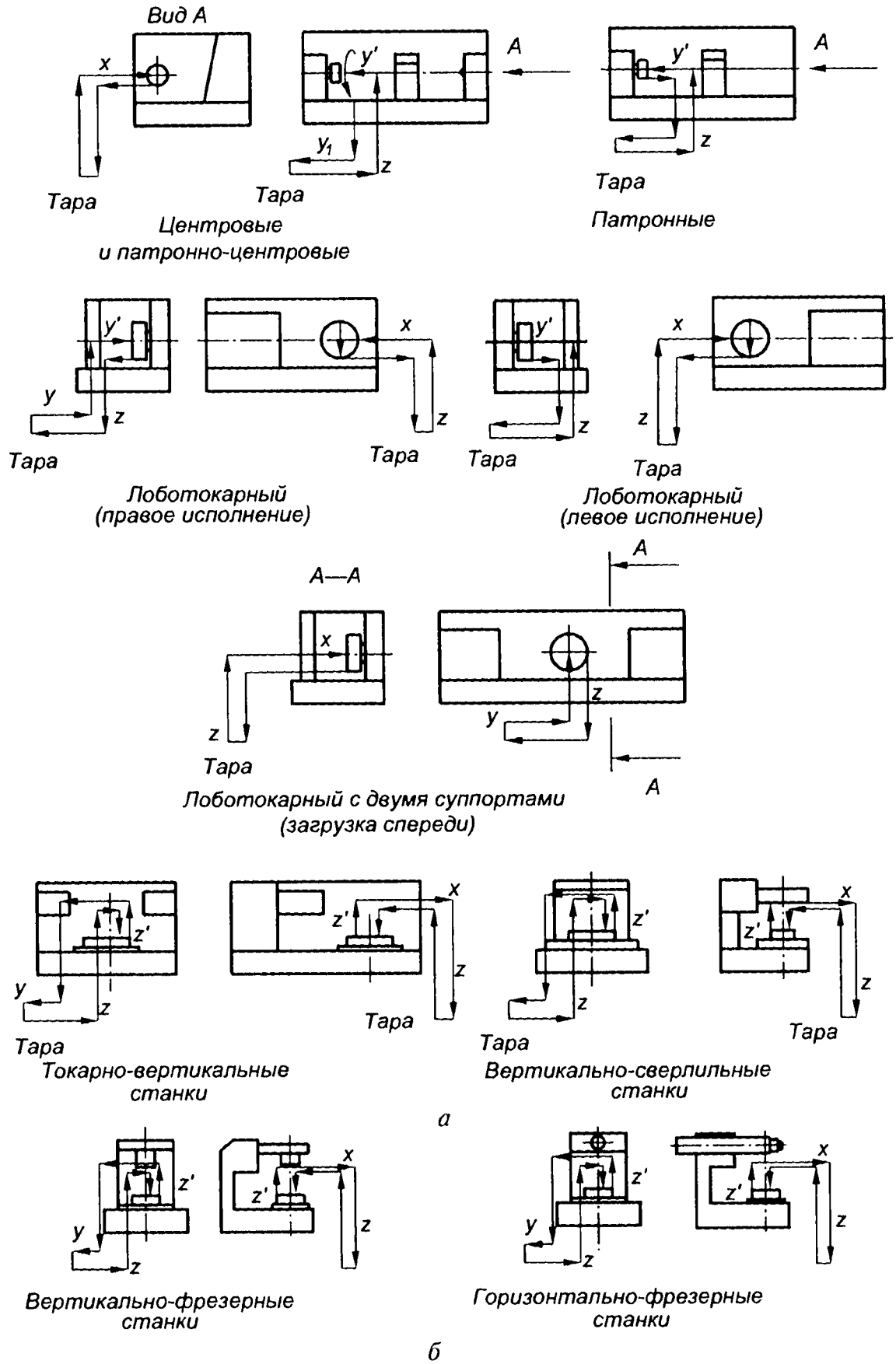


Рис. 4.14. Схемы загрузки промышленными роботами станков с горизонтальной (*а*) и вертикальной осью шпинделя или горизонтальным столом (*б*)

не более четырех станков. При использовании передвижного робота наиболее часто применяется линейно-параллельная планировка.

Во всех этих случаях предусматриваются необходимые меры по технике безопасности: ограждение, сигнализация, предельные фотодатчики и т.п. Место оператора должно быть безопасным, обеспечивать удобство наблюдения за работой оборудования и допускать доступ оператора в рабочую зону в периоды, свободные от выполнения операций загрузки и выгрузки.

На рис. 4.14 показаны схемы загрузки и выгрузки деталей промышленными роботами для различных типов станков: с горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) осью шпинделя.

4.4. Автоматизированные рабочие места

В условиях гибкого управления производством, особенно на этапе освоения новых изделий, одной из основных становится проблема эффективности использования трудовых ресурсов предприятия. Это вытекает из того, что производственный персонал, особенно квалифицированный и занимающий высокие позиции в иерархии управления, требует учета различных факторов социального, правового, организационного, экономического и производственно-технического характера.

В процессе организации управления гибкими производствами при работе с персоналом должны выполняться следующие функции:

обеспечение эффективной структуры должностей с минимальным штатом сотрудников и ограниченным доукомплектованием производственно-технических подразделений, привлекаемых для освоения новых видов продукции;

повышение квалификации руководителей и исполнителей в этих подразделениях, включая общую и профессиональную подготовку с учетом освоения новых изделий;

расстановка кадров и назначение руководящих лиц с учетом наиболее рациональной организации работы;

разработка структуры производства и управления, а также информационных потоков и функциональных взаимосвязей между сотрудниками и подразделениями;

создание соответствующих форм и структуры документооборота, организующих производственный процесс.

Современным средством повышения эффективности труда управленцев и специалистов является создание для них автоматизированных рабочих мест (АРМ).

Современное АРМ, как правило, строится на базе компьютерного монитора с клавиатурой и с другими средствами ввода информации (например, сканером) и системного блока, снабженного программно-математическим обеспечением, ориентирован-

ным на проблемы, решаемые соответствующим специалистом. Такие АРМ обычно являются терминалами общей локальной вычислительной сети (ЛВС).

Схема использования АРМ для управления различными уровнями производства как единого целого, приведена на рис. 4.15.

Здесь представлены АРМ различных уровней:

управления фирмой, включая АРМ директора и его заместителей, главных специалистов(например, главных конструктора, технолога, бухгалтера и др.), начальников отделов служб, специалистов отделов по планированию и учету, а также операторов складов общезаводского подчинения;

технической подготовки производства, включая АРМ конструкторской и технологической систем автоматизированного проектирования, а также управления технической подготовкой производства;

управления цехами, включая АРМ начальников цехов, начальников бюро, мастеров участков, диспетчеров бюро, экономистов цехов, контролеров ОТК, а также операторов внутрицеховых кладовых;

нижнего уровня оперативного управления ходом производства, включая АРМ руководства производством, экономистов, плановиков, диспетчеров, работников служб эксплуатации, мастеров, операторов оборудования, операторов ОТК, операторов-комплектовщиков, операторов подготовки инструмента, операторов сборки УСПО, а также операторов системы транспортировки.

Некоторые из названных АРМ могут использоваться одновременно на нескольких уровнях.

В целом применение АРМ, особенно подключенных к локальной вычислительной сети, обеспечивает синтез труда управленцев и организаторов производства, инженеров (конструкторов и технологов) и программистов.

Через АРМ должна проходить документация, обеспечивающая производственный процесс, а именно:

- модели производственно-сбытовой деятельности;
- оперативно-календарные планы;
- ведомости материально-технического снабжения;
- оперативные отчеты о ходе производственно-сбытовой деятельности за тот или иной период;
- информация, необходимая для проведения оперативных совещаний;
- задания на выполнение оперативных решений;
- результаты контроля за оперативными решениями;
- производственные графики на различные периоды;
- графики обеспечения сырьем, материалами, комплектующими, специальной техникой, кадрами, транспортом и другим, составленным на различные периоды;
- графики внутренних перевозок на различные периоды;

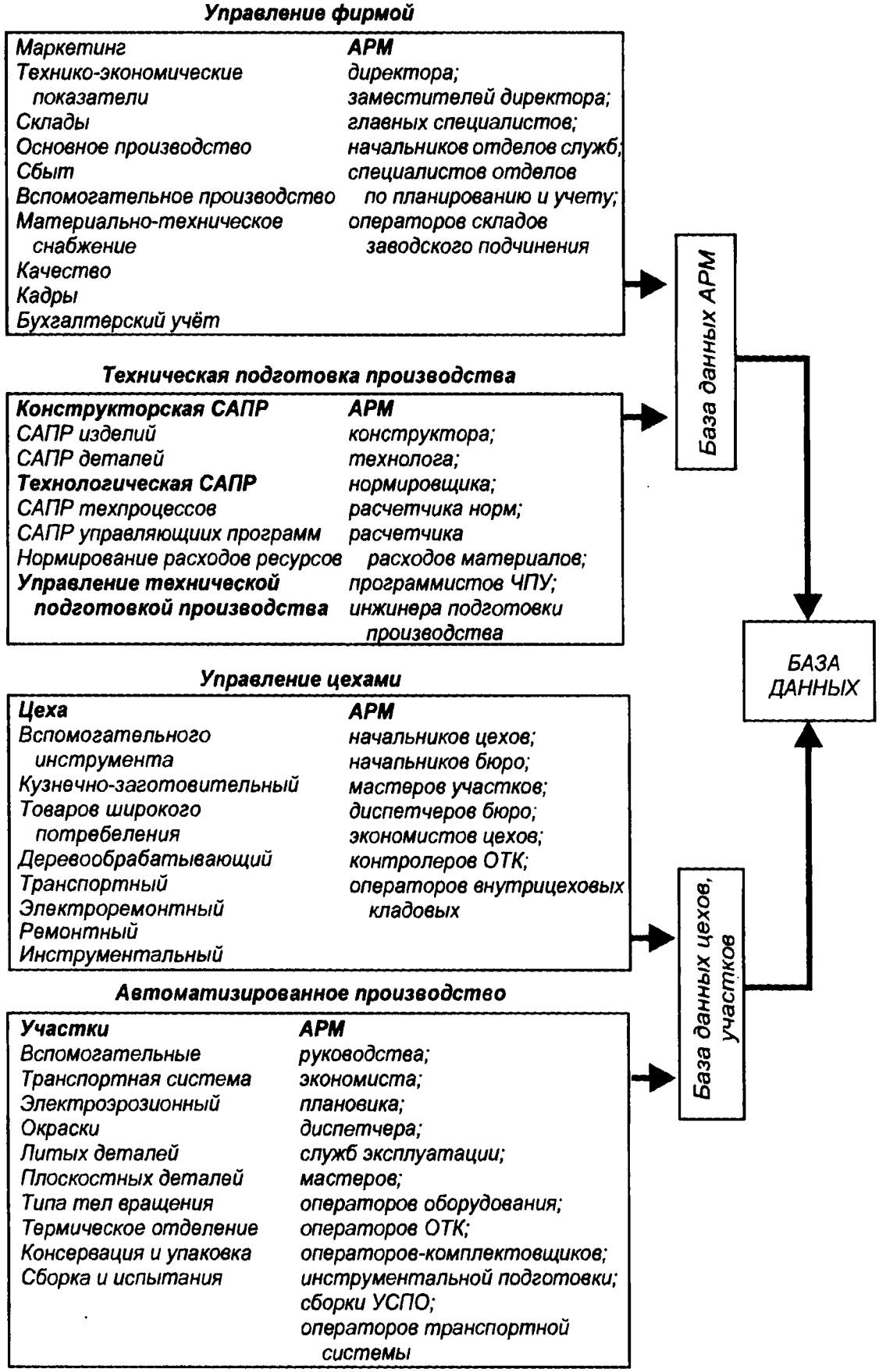


Рис. 4.15. Схема использования АРМ на различных уровнях управления производством

• графики внешних перевозок на различные периоды, а также некоторые другие.

Системы компьютеризации информационных систем на базе АРМ в настоящее время могут быть оснащены следующими разновидностями программных средств:

• пакеты проблемно-ориентированных прикладных программ;

• программы, обеспечивающие организацию вычислительного процесса в условиях многозадачного режима;

• программы автоматизации программирования, а также кодирования и декодирования для конкретных компьютеров;

• тестовые и наладочные программы.

С помощью упомянутых средств в широких масштабах выполняются такие работы, как оформление заказов, учет наличия и уровней запасов сырья, материалов, комплектующих и готовых изделий. Они применяются также для составления и документирования торговых отчетов и анализов, прогнозов продаж. Эти средства применяются и для документирования операций складирования и транспортировки.

АРМ применяются, кроме того, для диалогового проектирования в конструкторских и технологических САПР при решении задач, не поддающихся формализации, а также при решении оперативных задач. В первую очередь с применением АРМ решаются следующие задачи:

• сопоставление и выбор проектных вариантов;

• проектирование специальных оснастки, инструмента и штампов;

• проектирование процессов сборки;

• управление процессами комплектования заказов и партий обработки;

• управление автоматизированными складами и транспортной системой;

• управление обслуживанием и эксплуатацией оборудования.

4.5. Роботизация промышленных производств

Роботизация технологического процесса необходима для повышения интенсивности производства промышленной продукции. Применение робототехники высвобождает вспомогательных рабочих для основного производства, сокращает удельные затраты, улучшает условия труда, повышает его интеллектуальный уровень, сокращает объем монотонного труда, повышает качество продукции, оптимизирует загрузки оборудования, способствует автоматизации оборудования и применению принципиально новых технологических процессов, сокращает сроки освоения новой продукции.

Промышленный робот — это автоматическая машина, представляющая собой совокупность манипулятора и перепрограмми-

руемого устройства управления и предназначенная для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций, заменяющих аналогичные функции человека.

Одно из основных достоинств промышленных роботов — возможность их быстрой переналадки для выполнения различных операций, поэтому наиболее эффективным является применение роботов в условиях частой смены объектов производства в сочетании со станками с ЧПУ.

По конструктивно-технологическому признаку промышленные роботы делятся на две группы: производственные и подъемно-транспортные. Производственные роботы составляют около 20 % мирового парка роботов, а подъемно-транспортные соответственно около 80 %.

К первой группе относятся роботы, непосредственно участвующие в технологическом процессе в качестве производящих или обрабатывающих машин. Примером могут служить роботы для трубо- и профилегибочных работ, роботы для сварки, сборки, окраски, а также для контроля изделий.

Роботы второй группы используются для выполнения различных транспортно-складских и погрузочно-разгрузочных операций.

В конструкциях ряда промышленных роботов имеется возможность выполнения обоих типов работ. Однако в механообработке в большей степени находят применение подъемно-транспортные роботы.

В основе классификации промышленных роботов могут быть использованы следующие признаки:

- степень специализации;
- назначение;
- грузоподъемность;
- число степеней подвижности;
- возможность передвижения;
- способ установки на рабочее место;
- вид системы координат;
- разновидность привода и системы управления;
- способ программирования.

По своему назначению и специализации промышленные роботы, применяющиеся в механообработке, делятся на четыре группы:

1. *Специальные промышленные роботы* — это роботы, предназначенные для выполнения какой-либо одной технологической операции или для работы с определенным типом деталей. Они, как правило, ориентированы на обслуживание узкой номенклатуры технологического оборудования. Такие роботы оснащаются автономными системами управления собственным автоматическим циклом или управляются системой ЧПУ обслуживаемого станка. Грузоподъемность их лежит в пределах 5... 500 кг. Примером тако-

го типа роботов являются роботы для загрузки токарных станков валами и фланцами весом до 50 кг.

2. *Специализированные промышленные роботы* — это роботы, предназначенные для выполнения технологических операций какого-либо вида, например для штабелирования, обслуживания автоматизированных складов, выборки и раскладки деталей, ориентированно расположенных в специальной таре и т. д. Грузоподъемность таких роботов лежит обычно в пределах 2,5...500 кг. Характерным представителем роботов этого типа является японский робот «Кавасаки Юнимейт», предназначенный для выполнения сварочных операций.

3. *Целевые промышленные роботы* предназначены для выполнения одной или нескольких операций, но могут обслуживать станки широкой номенклатуры, выполняя действия сходного характера, связанные с манипулированием заготовкой и обработанной деталью. Грузоподъемность таких роботов обычно лежит в пределах 20...250 кг. Примером таких роботов может служить загрузочно-разгрузочный робот, предназначенный для обслуживания различных токарных станков, но с горизонтальной осью шпинделя.

4. *Универсальные промышленные роботы* используются для обслуживания оборудования различного технологического назначения, которое в отличие от ранее рассмотренных вариантов может требовать разнообразных приемов при выполнении операций обслуживания. Грузоподъемность таких роботов лежит в пределах 2,5...40 кг.

По грузоподъемности промышленные роботы подразделяют на *сверхлегкие* (номинальная грузоподъемность до 1 кг), *легкие* (1...10 кг), *средние* (10...200 кг) и *тяжелые* (200...1000 кг).

По способу установки на рабочем месте промышленные роботы разделяют на *напольные*, *подвесные* и *встроенные*.

Основные схемы промышленных роботов приведены на рис. 4.16.

Эффективность роботизации производства определяется в первую очередь сокращением сроков технической подготовки производства (ТПП) и освоения новых изделий. Экономическая эффективность сокращения сроков освоения новых изделий и ТПП может быть определена следующим образом.

Обобщенный безразмерный показатель эффективности ТПП при освоении нового изделия ($K_{об}$) выражается так:

$$K_{об} = K_1 K_2 K_3,$$

где K_1 — показатель эффективности затрат на ТПП при базовом варианте; K_2 — показатель значимости доли осваиваемого изделия в общем объеме выпускаемой предприятием продукции; K_3 — показатель окупаемости затрат на организацию производственно-технологического варианта освоения новой продукции.

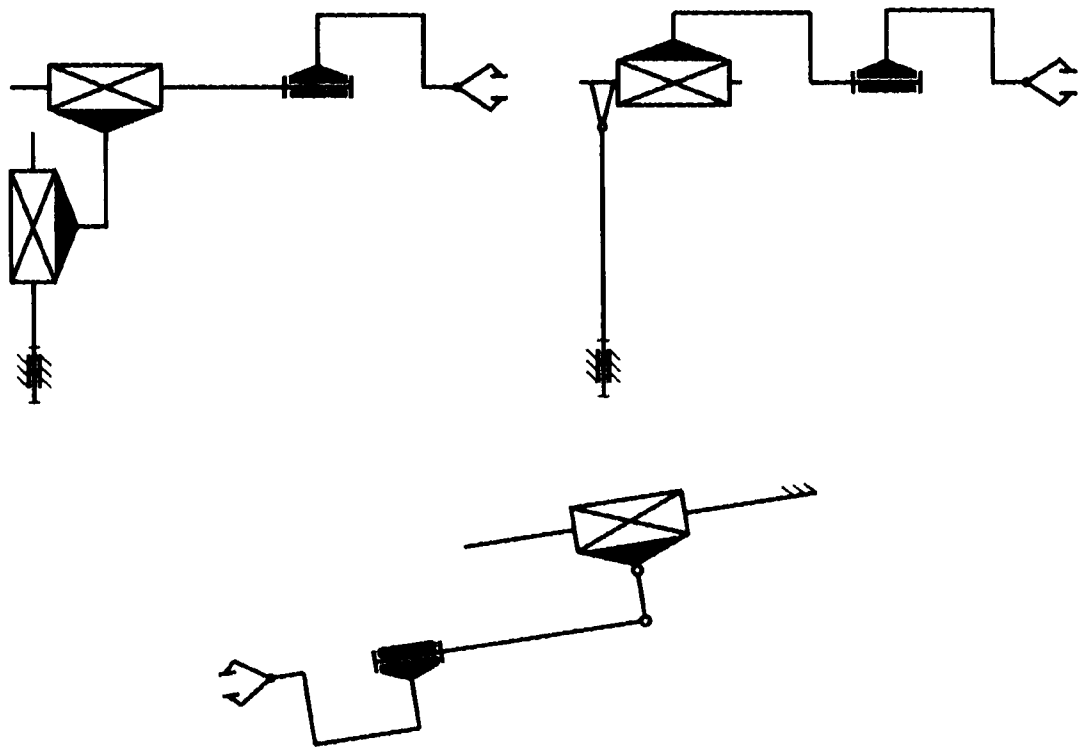


Рис. 4.16. Основные структурные схемы промышленных роботов

Эти безразмерные показатели рассчитываются по приведенным ниже формулам:

$$K_1 = p_1 p_2 (\sum Э) / (\sum З_{ТПП}),$$

где p_1 — вероятность завершении ТПП в установленные сроки для рассчитываемого варианта; p_2 — вероятность освоения установочной партии новых изделий в установленные сроки; $\sum Э$ — величина возрастания общей эффективности производства в результате применения роботизации по рассчитываемому варианту; $\sum З_{ТПП}$ — суммарные затраты на роботизацию по рассчитываемому варианту;

$$K_2 = p_2 p_3 Э' A_{год} T / (\sum З_{пр}),$$

где p_3 — вероятность достижения проектной мощности производства нового изделия в заданные сроки; $Э'$ — ожидаемая прибыль от продаж нового изделия; $A_{год}$ — запланированный годовой объем выпуска нового изделия; T — срок морального старения осваиваемого изделия; $\sum З_{пр}$ — общие суммарные затраты на серийное производство нового изделия;

$$K_3 = p_3 П_{пр} / (\sum З_{пр} + \sum З_{об}),$$

где $П_{пр}$ — прибыль предприятия от освоения нового изделия; $\sum З_{об}$ — оборотные средства, затрачиваемые на производство при рассматриваемом варианте освоения нового изделия.

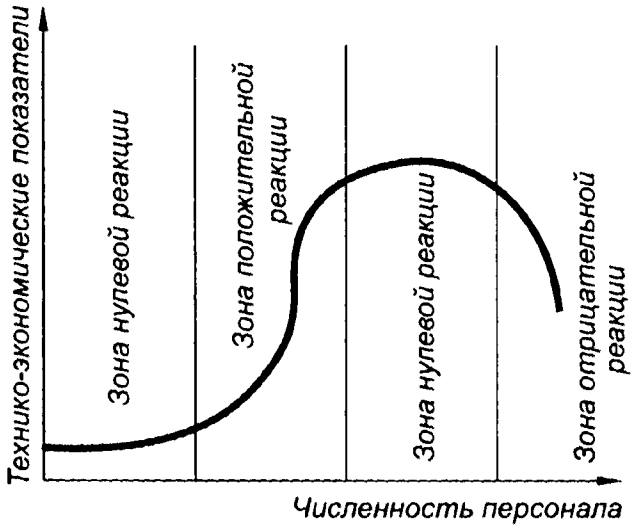


Рис. 4.17. Зависимость технико-экономических показателей производства от численности персонала

Роботизация производства дает возможность оптимальным образом устанавливать численность производственного персонала. Весьма важен в обеспечении эффективного использования трудовых ресурсов отбор кадров для коллектива производственного подразделения, создаваемого для освоения нового изделия. Использование работника на той или иной должности определяется его профессиональным уровнем, а также зависит от ряда других показателей, таких как накопленный опыт, возраст при зачислении на конкретную должность, наличие жилья и др.

Зависимость технико-экономических показателей производства от численности персонала приведена на рис. 4.17.

4.6. Робототехнические системы

Различные роботы в сочетании с обслуживаемыми ими станками или комплексами станков образуют *робототехнические системы*. Одним из важнейших классификационных признаков, определяющих выбор того или иного робота для объединения его с конкретным типоразмером станка в робототехническую систему, является его грузоподъемность. Наибольшее распространение в механообработке получили роботы грузоподъемностью 40, 80 и 160 кг. Роботы грузоподъемностью 250 и 500 кг используются для обслуживания тяжелых патронно-токарных и фрезерных станков, а также для выполнения погрузочно-разгрузочных и складских работ.

В табл. 4.5 приведены данные о целесообразном использовании промышленных роботов той или иной грузоподъемности для обслуживания различных станков.

На схемы загрузки станков, а значит, и на число степеней свободы применяемого промышленного робота оказывают влияние:

- характер ориентации деталей перед операцией загрузки;
- тип устройства для подачи деталей на позицию загрузки и для хранения деталей, например стационарная тара, транспортер, магазин, штабель, склад и т.д.;

Таблица 4.5

Операция		Универсальный станок	Полуавтомат	Станок с ЧПУ	Полуавтомат с ЧПУ, агрегатный станок	Автоматическая линия из участков	Комплексная автоматическая линия
Транспортирование	Подача заготовок со склада	□	□	□	□	□	□
	Межстаночное транспортирование	□	↙□	↙□	↙□	△	△
	Вывоз обработанных деталей из цеха	□	□	□	□	□	□
Хранение	В начале обработки на автоматической линии		–	–	–	●▲	●▲
	У станка	●	↙●▲	↙●▲	↙●▲	▲	▲
	В конце обработки на автоматической линии	–	–	–	–	●▲	●▲
Ориентирование детали	Перед хранением	–	↙–	↙–	↙–	○	○
	При транспортировании	–	–	–	–	△	△
	Перед обработкой	○	↙○	↙○	↙○	△	△
	После обработки	–	–	–	–	△	△
Загрузка	В накопитель (транспортер, магазин) в начале автоматической линии	–	–	–	–	○↗	○↗
	В станок	○	○↗	○↗	○↗	△	△
	С одного участка автоматической линии на другой	–	–	–	–	○△↗	–
Выгрузка	Из накопителя (транспортера, магазина) в конце автоматической линии	–	–	–	–	○↗	○↗
	Со станка	○	○↗	○↗	○↗	△	△
Крепление детали	Зажим	○	↙□	↙○	↙□○	△	△
	Разжим	○	↙□	↙○	↙□○	△	△
Управление процессом резания	Позиционирование	○	△	△	△	△	△
	Изменение подачи	○	↙○	△	△	△	△
	Изменение скоростей	○	↙○	↙○△	△	△	△
Дополнительные операции на станке	Смена инструмента	○	○↗	○↗	△	△	△
	Измерение детали	○	↙○↗	↙○↗	↙○↗	○△	○△
	Уборка стружки	○	○△	○△	○△	△	△
	Очистка базовой поверхности	○	○↗	○↗	○↗	△	△
	Открытие, закрытие кожуха	○	↙○↗	↙○↗	↙○↗	△	△

↗ — операция выполняется ПР;
↙ — операция автоматизируется благодаря применению ПР;
△ — операция выполняется механизмом автоматически;
□ — операция выполняется механизмом от ручной подачи;
○ — операция выполняется вручную;
▲ — детали хранятся в ориентированном виде в магазине, накопителе, транспортере;
● — детали хранятся навалом.

• характер выполняемой операции, например перенос детали из тары на станок без перебазирования или с перебазированием;

• компоновка станка: для станков токарной группы — вертикальная или горизонтальная, для станков фрезерной и сверлильной групп — вертикальное или горизонтальное положение плоскости рабочего стола;

• количество станков, одновременно обслуживаемых данным роботом;

• планировка производственного участка (например, линейная, линейно-параллельная, круговая).

Все перечисленные в приведенной таблице модели станков с точки зрения конструктивной возможности комплектации их промышленными роботами разделяются на две группы:

станки с горизонтальной осью шпинделя, в которых заготовка подается на линию центров и далее движением вдоль этой оси устанавливается в зажимное устройство (в патрон или в центр);

фрезерные и сверлильные станки с горизонтальным столом и вертикальные токарные станки, в которых заготовка подается выше базовой плоскости стола, патрона или центра и последующим движением сверху вниз доводится до соприкосновения с плоскостью установки.

Промышленный робот, осуществляющий загрузку этих станков, должен обладать, как минимум, двумя степенями свободы из следующих (т.е. независимых движений рабочего органа):

перемещение на тару;

перемещение на станок;

подъем-опускание;

поворот руки робота на 180° вокруг оси, так называемым кантование;

захват.

Дополнительной степенью свободы принято считать поворот оси детали на 90°.

Для загрузки любой группы станков робот должен иметь по крайней мере две степени свободы (без учета движения захвата). Если же речь идет об обслуживании станков первой группы, и детали устанавливаются в патрон или центр независимо выполняемым движением, то число степеней свободы соответствующего робота должно быть на единицу больше.

Таким образом, промышленные роботы могут обслуживать различные станки, используемые в современном производстве, а именно: станки с ручным управлением, цикловые станки-полуавтоматы, станки-полуавтоматы с ЧПУ и автоматической сменой инструмента, агрегатные и специальные станки. Основной привод промышленных роботов — гидравлический или электрогидравлический, а привод движений захвата — гидравлический или пневматический.

Для обслуживания названных типов станков и создания робототехнических систем используются роботы различных типов.

1. Стационарные целевые роботы для загрузки станков с горизонтальной осью шпинделя штучными деталями типа тел вращения (роботы I типа). Они выполняют следующие функции:

установку заранее ориентированных деталей или заготовок на станок;

снятие заготовок со станка и раскладку их в тару (магазин);

кантование деталей, если в этом есть необходимость.

2. Стационарные целевые роботы для загрузки станков с вертикальной осью шпинделя или с горизонтальным столом штучными заготовками, в том числе и заготовками, требующими предварительной установки в специальные установочные приспособления-спутники (роботы II типа). Промышленный робот II типа выполняет следующие функции:

установку заранее ориентированных деталей или заготовок на станок;

снятие заготовок со станка и раскладку их в тару (магазин);

кантование деталей;

установку-снятие ориентированных деталей (спутников) на начальных и на конечных позициях станков, входящих в состав автоматизированных участков и автоматических линий;

Один промышленный робот II типа обслуживает обычно 1 — 3 станка, входящих в состав автоматизированного комплекса.

3. Передвижные роботы, предназначенные для работы в составе автоматизированных участков и производств; к этому типу относятся целевые и универсальные роботы для загрузки оборудования с разнотипными схемами обслуживания (роботы III типа). Основные функции промышленного робота III типа:

установка заранее ориентированных деталей или заготовок на станок;

снятие заготовок со станка и раскладка их в тару (магазин);

кантование деталей, если это необходимо;

фиксация и контроль правильности базирования заготовки в патрон или в центр;

очистка баз детали и станка.

Дополнительными функциями при этом являются:

смена захватов;

смена инструментов;

контроль обработанных поверхностей;

передвижение тары с заготовками от станка к станку;

определение последовательности обслуживания оборудования;

управление транспортной системой и складом автоматизированного производственного участка.

Один промышленный робот III типа обслуживает обычно 2... 8 станков. Основные характеристики роботов описанных типов приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Характеристика	Тип робота		
	I	II	III
Грузоподъемность, кг	20, 40, 80, 160, 250	20, 40, 80, 160, 250	40, 80, 160, 250
Минимальное число степеней свободы (без учета движения захвата)	4 или 5	4 или 5	4 (из них 3 — программируемых)
Число рук	1 или 2	1	1
Число захватов	1 или 2	1 или 2	1 или 2
Тип захватов	Клещевой	Клещевой, электромагнитный, специальный	Клещевой, электромагнитный, специальный
Движения исполнительных органов:			
вдоль оси руки	+	+	+
поворот в вертикальной плоскости (качание)	+	—	+
движение вдоль фронта станка (вдоль оси станка)	+	+	+
поворот захвата вокруг горизонтальной оси (ротация;	+	+	+
поворот корпуса вокруг вертикальной оси	—	+	—
вертикальное перемещение руки	—	+	+

Все разнообразие операций загрузки и разгрузки осуществляется тремя указанными типами промышленных роботов, но при использовании различных захватных устройств. Эти устройства предназначены для захвата обрабатываемой детали или инструмента и удержания его в определенном положении в процессе перемещения или обработки. Тип и конструкция захвата определяется формой, размером, массой и другими характеристиками захватываемого предмета, а также специфическими свойствами технологического процесса. К числу специфических требований относятся надежность захвата и удержания во время разгона и торможения подвижных частей промышленного робота, точность и стабильность базирования заготовки, недопустимость разрушения или повреждения предмета, прочность и большие усилия зажима при ограничениях на размеры и массу заготовки.

Классификация захватных устройств, применяемых в промышленных роботах, приведена на рис. 4.18.

4.7. Системы управления промышленными роботами

Управление промышленными роботами — это совокупность воздействий на их механизмы, обеспечивающих выполнение ими рабочего цикла, а *система управления* — совокупность устройств, реализующих эти воздействия. Применительно к роботам различают два вида управления: автоматическое и ручное.

Ручное управление основывается на том, что решения об исполнении тех или иных элементов рабочего цикла принимает человек — оператор робота, который включает или выключает соответствующие механизмы и задает параметры их работы. При ручном управлении используют различные исполнительные устройства: механические, гидравлические, пневматические, электрические, электронные и комбинированные.

Автоматическое управление состоит в том, что решения об исполнении элементов рабочего цикла принимает система управления без участия оператора. Она же выдает команды включения и выключения механизмов робота и управляет их работой.

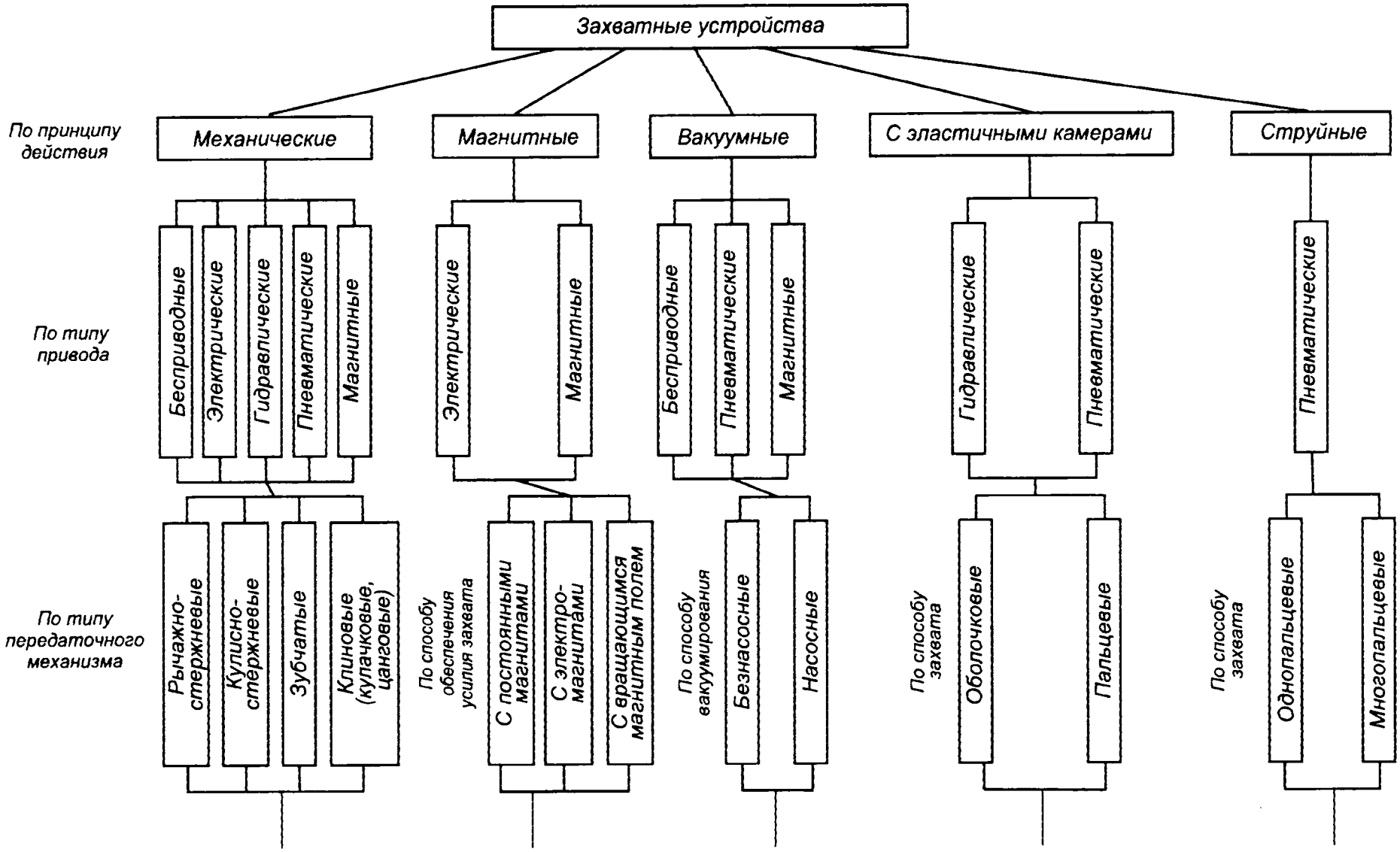
По функциональному назначению разделяют следующие виды автоматического управления:

управление неизменяемыми повторяющимися циклами обработки или загрузки-выгрузки; примером служат транспортные и загрузочно-разгрузочные устройства автоматических линий или агрегатных станков массового и крупносерийного производства циклы смены инструмента в многофункциональных станках типа «обрабатывающий центр»;

управление изменяемыми автоматическими циклами движений (цикловое программное управление), которое задают в виде индивидуальных для каждого цикла материальных моделей-аналогов (копиров, наборов кулачков, системы упоров и т.д.); примерами являются системы управления роботами для загрузки и выгрузки часто сменяющихся типов деталей, например на копировальные станки или станки с ЧПУ;

числовое программное управление, при котором программу задают в виде записанного на том или ином носителе массива информации; на ранних этапах развития систем программного управления эту информацию задавали в аналоговой форме (в виде сдвига фазы некоторого синусоидального напряжения по отношению к опорному синусоидальному напряжению той же частоты). Однако в последнее время в связи с развитием микроэлектроники и с появлением больших и сверхбольших интегральных схем («микрочипов») управляющая информация для систем ЧПУ роботами почти исключительно является дискретной и ее обработка ведется цифровыми методами.

Системы управления неизменяемыми циклами роботов традиционно строились на базе либо логических переключательных схем,


Захватные устройства
По принципу действия
Механические
Магнитные
Вакуумные
С эластичными камерами
Струйные
По типу привода
Бесприводные
Электрические
Гидравлические
Пневматические
Магнитные
Электрические
Магнитные
Бесприводные
Пневматические
Магнитные
Гидравлические
Пневматические
Пневматические
По типу передаточного механизма
Рычажно-стержневые
Кулисно-стержневые
Зубчатые
Клиновые (кулачковые, цанговые)
По способу обеспечения усилия захвата
С постоянными магнитами
С электро-магнитами
С вращающимся магнитным полем
По способу вакуумирования
Безнасосные
Насосные
По способу захвата
Оболочковые
Пальцевые
По способу захвата
Однопальцевые
Многопальцевые

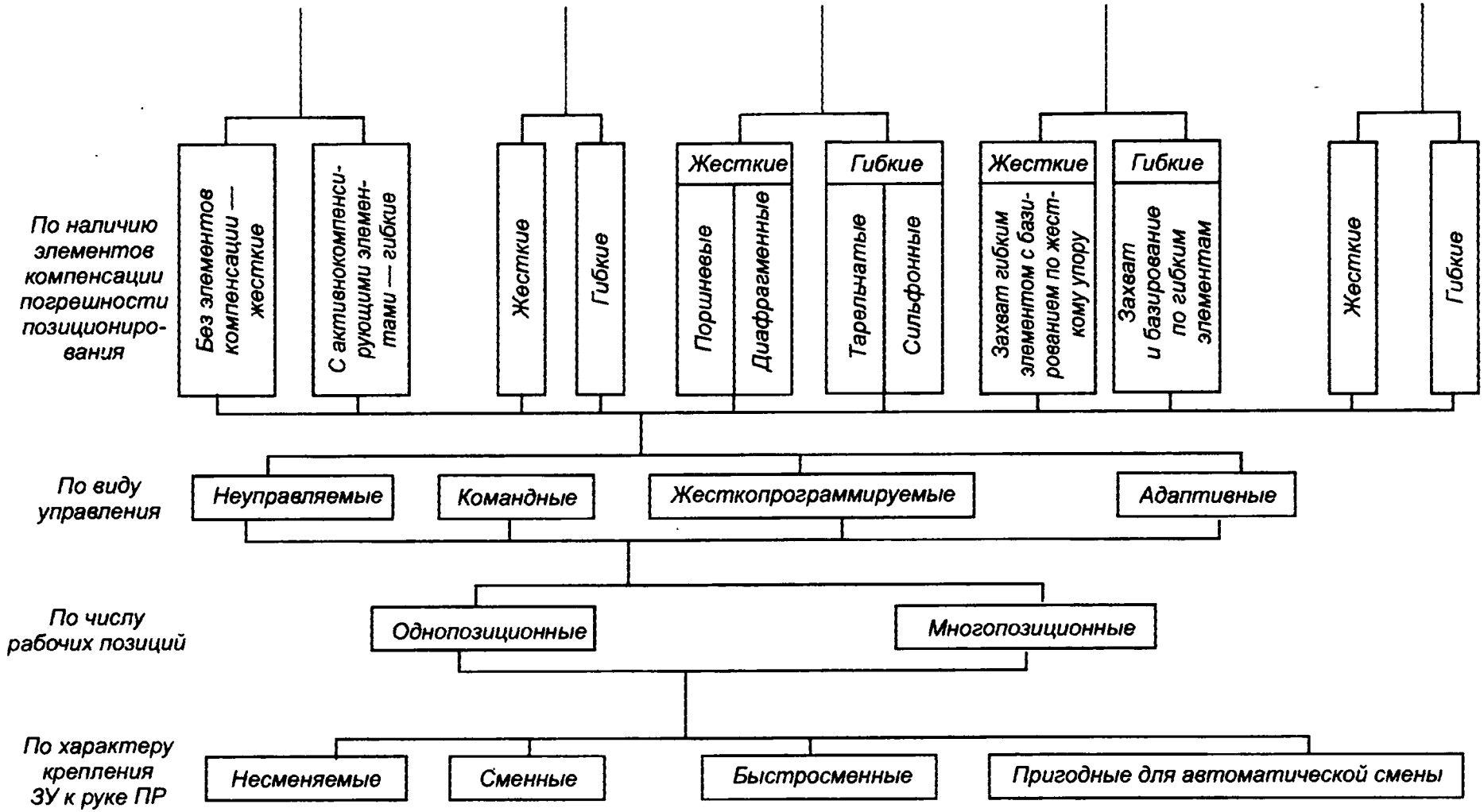


Рис. 4.18. Классификация захватных устройств

реализованных на электромагнитных контактных реле (воздействия на реле подаются от устройств типа путевых выключателей, срабатывающих непосредственно от движущихся рабочих органов робота), либо на базе электромеханических кулачковых командоаппаратов (при вращении вала с кулачками они нажимают в нужной последовательности на такие же путевые выключатели, воздействующие затем на электрические исполнительные цепи). В первом случае говорят об управлении в функции пути, а во втором — об управлении в функции времени. Во втором случае задающий вал командоаппарата может вращаться либо с постоянной скоростью, либо в старт-стопном режиме, когда его вращение после выдачи управляющих воздействий останавливается и включается вновь лишь по сигналу о выполнении заданных предыдущей командой перемещений. В настоящее время цикловое программное управление роботами в большинстве случаев технически реализуется на специальном логическом устройстве — «программируемом логическом командоаппарате» (ПЛК).

ПЛК (контроллер) представляет собой универсальное устройство, построенное по архитектуре цифрового компьютера, которое настраивают на управление конкретным циклом пользователя путем занесения в память этого ПЛК соответствующей рабочей программы (совокупности операторов). Эта программа согласует между собой содержимое адресов памяти, связанных с входными и выходными сигналами объекта управления (операндами). Будучи построенным по принципам универсального компьютера, ПЛК содержит в себе все его характерные блоки: процессор, оперативное запоминающее устройство, устройство управления, устройство ввода-вывода информации, устройство индикации. Вместе с тем он имеет и следующие существенные отличия:

разрядная сетка ПЛК минимально должна иметь длину лишь в один разряд, поскольку она служит для переработки дискретных сигналов типа «включено» и «выключено» (1 или 0);

минимально необходимая система команд ПЛК ограничена несколькими логическими операциями, например дизъюнкция, конъюнкция и инверсия. Эти команды являются аналогами параллельному и последовательному соединению замыкающих и размыкающих контактов релейных схем;

язык программирования для ПЛК основан на представлении команд в виде графических символов релейно-контактных схем либо операторов алгебры логики;

входными и выходными данными для ПЛК служат не массивы алфавитно-символьной информации, вводимой и редактируемой персоналом до начала их вычислительной обработки, а дискретные одноразрядные сигналы, либо поступающие от объекта управления в процессе работы, либо генерируемые в процессе вычислений. Поэтому существенной конструктивной особенностью

ПЛК является наличие устройств ввода-вывода сигналов (устройств сопряжения с объектом) и приспособленность таких ПЛК к эксплуатации в цеховых условиях.

Цикловое программное управление в свою очередь можно разделить на две группы.

К первой группе относятся так называемые *системы управления незамкнутого типа.* В них как моделью перемещения, так и источником энергии перемещения является непосредственно профиль задающего копира, например силового кулачка.

Вторая группа — *системы управления замкнутого типа.* Для них характерно наличие двух потоков информации и промежуточной между копиром-задатчиком и исполнительным органом следящей системы (обычно гидравлического типа). Здесь моделью перемещения, как и в предыдущем случае, является профиль задающего копира, а энергия перемещения подается из дополнительного источника, питающего следящую систему. Прямой поток информации от копира-задатчика поступает в следящую систему, где сравнивается с обратным потоком информации, поступающим по контуру обратной связи от датчиков исполнительного органа робота и характеризующим его фактическое положение. Следящая система обеспечивает минимальное рассогласование между заданным и фактическим положением исполнительного органа.

Системы ЧПУ представляют собой наиболее динамично развивающуюся группу систем автоматического управления. Эта группа систем управления приобрела в настоящее время преобладающее значение. Применительно к станкам системы ЧПУ практически вытесняют другие типы систем автоматического управления и используются для всех без исключения групп станков. Когда роботы применяются совместно со станками с ЧПУ, образуя единые робототехнические производственные комплексы, системы ЧПУ станков используются и для выдачи команд на исполнительные устройства роботов, т.е. являются общими. Тем самым осуществляется синхронизация элементов циклов роботов и обслуживаемых ими станков. Но системы ЧПУ, применяемые для роботов, могут представлять собой и автономные устройства. В этом случае программа работы такого робота оказывается самостоятельной.

По технологическому назначению и по функциональным возможностям системы ЧПУ роботами делятся на следующие группы.

1. Позиционные, в которых важны только координаты конечных точек положения исполнительных органов после выполнения ими тех или иных рабочих циклов, а траектория движения к этим конечным точкам значения не имеет.

2. Непрерывные или контурные, которые обеспечивают движение исполнительного органа по заданной криволинейной траектории.

3. Универсальные (комбинированные), в которых осуществляется программирование как координат конечных точек, так и траектории движения исполнительных органов.

По способу подготовки и ввода управляющей программы системы ЧПУ как станками, так и роботами делятся на оперативные системы и системы с автономной подготовкой УП.

В первом случае УП готовится и редактируется непосредственно на станке или на программируемом роботе в процессе обработки первой детали в партии или имитации ее обработки.

Во втором случае УП готовится независимо от обработки детали или от движений робота, которые должны быть запрограммированны.

Системы автоматизации программирования (САП) играют большую роль при разработке программ как для станков с ЧПУ, так и для роботов. При этом требуется, чтобы во время составления УП с помощью подобных систем станок с ЧПУ или робот не отвлекался от своей прямой работы по обработке, загрузке, выгрузке и транспортировке деталей.

Различные современные САП имеют своей целью существенно сократить объем исходной информации, необходимой для составления УП. Вся информация, однозначно определяющая операции по обработке детали, содержится в ее рабочем чертеже. Дальнейшая обработка этой информации и получение данных для составления УП состоит в выпуске различного рода технологической документации, определяющей маршрутную и операционную технологию, выбор заготовки, схемы базирования и зажима, инструментальные наладки и др. Эти сведения при составлении УП тем или иным способом кодируются и наносятся на соответствующий программоноситель. Но в современных САП решение ряда технологических вопросов заложено в сами эти системы, так что информация, необходимая для составления УП, оказывается близкой к данным рабочего чертежа детали, может быть определенным образом формализована и записана на специальном проблемно-ориентированном языке программирования.

За рубежом специальным языком описания программной обработки деталей на станках с ЧПУ являются так называемые АПТ-образные языки. Подобные языки происходят из базового языка АПТ, по-английски — APT: Auto Programming Tools (Автоматическое программирование движения инструмента). Система автоматического программирования должна включать в себя языковые средства описания обработки детали на станке с ЧПУ, программу-транслятор, преобразующую это описание в коды УП, набор инструкций и эксплуатационной документации.

Отечественным аналогом этой системы APT является система ТЕХТРАН (Технологический Транслятор). Базовый ТЕХТРАН представляет собой транслятор с проблемно-ориентированного

языка высокого уровня, предназначенного для выполнения расчетов, описания геометрических объектов и задания технологических команд. Система ТЕХТРАН обеспечивает слежение за процессом вычислений и предусматривает диагностирование ошибок в исходном тексте. Система позволяет программировать движение по любым плоским контурам, состоящим из наборов точек, прямых и дуг окружностей. По оси, перпендикулярной плоскости такого контура, возможны перемещения типа «точка—точка». Последовательность подготовки исходного описания движений для последующей трансляции системой ТЕХТРАН такова:

выбирают систему координат и определяют контурные элементы траектории;

выбирают исходную точку для траектории;

определяют последовательность движений;

составляют описание траектории движения на языке ТЕХТРАН, а также чередования движения и выдачи технологических команд.

В языке ТЕХТРАН используются следующие типы объектов, описывающих элементы траектории, и их обозначения:

- целые и вещественные числа (ЦЕЛОЕ, ВЕЩ);
- логический переход (ЛОГИЧ);
- точка (ТОЧКА);
- вектор (ВЕКТОР);
- прямая (ПРЯМАЯ);
- окружность (ОКРУЖН);
- плоскость (ПЛОСК);
- матрица (МАТР).

Используются также макроопределения, т.е. типовые безразмерные блоки, и описания контура. Имена, начинающиеся с обозначения ТЧ, описывают точки, начинающиеся с ПР — прямые, а с КР — окружности. Объекты с именем одного типа можно объединять в массивы, которые могут быть как одномерными, так и двухмерными.

В языке ТЕХТРАН операндами могут служить формулы, логические выражения, а также ряд стандартных (например, тригонометрических) функций.

В системе предусмотрены различные виды задания точек, прямых, окружностей, векторов и массивов, которые выбираются при составлении УП с учетом удобства представления траектории и простановки размеров ее элементов.

Точка может быть представлена ее прямоугольными координатами, пересечением двух ранее определенных прямых, пересечением прямой и окружности, пересечением двух окружностей, центром ранее определенной окружности и др. (всего в системе существует 16 способов представления). Прямая может быть представлена двумя парами координат, двумя точками, точкой

и касанием с ранее определенной окружностью, касанием с двумя ранее определенными окружностями, точкой и углом к данной прямой и др. (всего 14 способов описания). Вектор можно описать проекциями на оси координат при совпадении его начала с началом координат, начальной и конечной точками, парами координат начала и конца, суммой двух данных векторов и т.д. (всего 11 способов).

Исходный текст УП на языке ТЕХТРАН содержит также управляющие операторы, операторы постпроцессора и движения.

В системе предусмотрены операторы движения трех типов: «точка — точка», непрерывного и фиктивного.

Изменение порядка выполнения и перекомпоновка программы осуществляются с помощью оператора НАМЕТКУ.

Важнейшим достоинством системы ТЕХТРАН является наличие аппарата макроопределений. Это позволяет по мере эксплуатации системы и накопления данных по обрабатываемым деталям повышать уровень автоматизации путем включения в систему эксплуатационниками отработанных макроопределений (блоков) без доработок основного программного обеспечения.

Выше была кратко описана основная версия языка ТЕХТРАН, так называемый базовый ТЕХТРАН. Вместе с тем программирование процессов обработки простых деталей и деталей средней сложности, особенно токарных, сопряжено с относительно большой (часто неоправданной) длительностью составления исходного текста и необходимостью детальной проработки технологической документации. Существенное упрощение этого подготовительного этапа может быть достигнуто путем выделения типовых конструктивных элементов контура детали или траектории движения исполнительного органа. При использовании групповой технологии такая типизация производится заранее, и программы формирования типовых технологических схем обработки или типовых движений исполнительных органов могут быть включены в систему в качестве функциональных программных блоков. В результате был получен ряд специализированных высокоавтоматизированных САП на основе языка ТЕХТРАН — системы для токарных станков, обрабатывающих центров.

4.8. Визуализация и идентификация грузоединиц

Для визуализации и идентификации грузоединиц, образующих материальные потоки, в современных производствах создаются интегрированные компьютеризованные информационные системы с соответствующим программным и лингвистическим обеспечением. Современные компьютерные средства, образующие интегральную информационную систему, объединяются с использованием иерархического принципа в *локальные вычислительные*

сети. Эти сети объединяются в многоуровневые сетевые структуры, так называемые *гиперсети*.

На нижнем уровне интегрированных информационных систем в современных гибких компьютеризованных производствах располагаются следующие технические средства:

- устройства сбора, регистрации и подготовки данных (регистраторы, устройства клавишного ввода, установки промышленного телевидения, устройства сканирования и др.);
- устройства передачи данных (телексы, факсы, концентраторы, электронная почта и др.);
- каналы связи, сетевые устройства и средства (телефонные линии и радиоканалы, серверы и др.);
- устройства обработки информации (персональные компьютеры, счетно-перфорационные машины, сортировочные узлы и др.);
- устройства хранения и накопления информации (устройства оперативной и внешней памяти на различных носителях);
- оконечные терминальные устройства (табло, мнемосхемы, мониторы, клавиатура, принтеры и плоттеры и др.).

К верхним уровням интегрированных информационных систем логистики относятся следующие технические средства:

- унифицированные каналы связи;
- аппаратура приема-передачи данных (модемы);
- персональные компьютеры, выполняющие функции диспетчеров обмена информацией;
- компьютеры значительной мощности и быстродействия, включая дополнительные устройства оперативной памяти, устройства внешней памяти и терминальные устройства;
- устройства подготовки, контроля, визуализации, документирования и размножения информации, а также различные устройства оргтехники.

В современных компьютеризованных интегрированных информационных системах используются также различного рода неразрушаемые носители машинной информации. К их числу относятся сканируемые бумажные документы, перфоленты, перфокарты, гибкие диски и дискеты, компакт-кассеты с магнитной лентой, лазерные диски типа CD ROM.

Скомплектованный и структурно организованный многоуровневый комплекс технических средств интегрированной информационной системы может функционировать только при наличии соответствующего математического и программного обеспечения.

Средства компьютеризации рассматриваемых информационных систем в настоящее время могут быть оснащены следующими разновидностями программных средств:

- пакетами проблемно-ориентированных прикладных программ;
- программами, обеспечивающими организацию вычислительного процесса в условиях многозадачного режима;

• программами автоматизации программирования, а также кодирования и декодирования для конкретных компьютеров;

• тестовыми и наладочными программами.

С помощью упомянутых средств выполняются такие работы, как оформление заказов, учет наличия и уровня запасов сырья, материалов, комплектующих и готовых изделий. Указанные средства применяются также для составления и документирования торговых отчетов и анализов, составления различного рода прогнозов, для операций складирования и транспортировки.

При построении информационных систем могут быть широко использованы программные комплексы, обеспечивающие выпуск выходной документации в виде распечатанных таблиц и графиков. Такие распечатки, называемые табуляграммами, позволяют оперативно находить различные варианты решений задач управления. Таким образом, информационная система является именно тем компонентом, который объединяет всех участников производственно-сбытовой деятельности в единое целое.

Для того чтобы эффективно осуществлять управление материальными потоками, нужно собирать оперативную информацию о движении образующих эти потоки грузоединиц.

Информация о факте пребывания той или иной грузоединицы в данное время в данном месте может быть введена в компьютеризованную информационную систему разными способами. Часто эти способы основаны на вводе персоналом с помощью клавиатуры тех или иных фактических данных, содержащихся в соответствующих накладных или счетах-фактурах. Однако наиболее современный метод — автоматический ввод данных и идентификация грузоединиц, что достигается путем сканирования (компьютерного считывания) укрепленных на грузоединице ярлыков, содержащих специальные, так называемые штриховые, коды; само считывание осуществляется с помощью оптических, большей частью лазерных устройств.

Штриховые или полосковые коды представляют собой сочетание размещенных на грузоединице в фиксированном прямоугольнике чередующихся толстых и тонких черных полос, разделенных светлыми (незачерненными) промежутками также разной ширины. Каждая из десяти цифр и некоторые символы кодируются своим сочетанием этих полос.

Существуют и практически используются несколько видов штриховых кодов, каждый из которых имеет свое назначение и область преимущественного применения.

Штриховой код, ограниченный прямоугольной рамкой, воспринимается с большей достоверностью, чем коды, не ограниченные такими рамками. Поэтому он применяется для нанесения на неровные поверхности (например, на гофрированные поверхности упаковок).

В товарообороте, особенно в розничной торговле и в поставке товаров на экспорт, исключительное применение нашел штриховой код типа EAN (European Article Numbering — общеевропейское кодирование изделий). Этот код продавец сканирует в момент продажи товара.

Структура такого кода состоит из 13 цифр. Две или три левых цифры представляют собой код страны-изготовителя, установленный для нее согласно EAN. Эта часть кодового обозначения называется также флагом. Например, такими кодами (флагами) некоторых стран являются: для США — 00...09; для стран СНГ — 460...469; для Германии — 400...440; для Японии — 48, 49; для Израиля — 729; для Швеции — 73 и т.д.

Следующие четыре цифры служат для размещения кода фирмы-изготовителя.

Оставшиеся цифры, за исключением последней, 13-й, отводятся изготовителю для кодирования выпускаемой им продукции по его усмотрению.

Последняя, 13-я, цифра является контрольной. Она рассчитывается по определенной формуле на основании первых 12 цифр. Определенная таким путем контрольная цифра наносится в отведенном ей месте кодового обозначения вместе с основной его частью. При идентификации принимаемого товара значение контрольной цифры, определенное после ввода по той же расчетной формуле на основании фактически введенных 12 первых цифр информации, сравнивается с введенной контрольной цифрой. Если эти цифры не совпадают, значит, ввод был осуществлен неверно. Обычно ошибки ввода устраняются при повторном сканировании, хотя иногда это может оказаться недостаточным.

Следовательно, системы ввода идентифицирующих данных вместе с системами хранения и поиска этих данных, так называемыми компьютерными банками данных, снабженными системами управления базами данных (СУБД), дают возможность реализовывать интегрированные структуры современных многономенклатурных компьютеризованных производств.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит проблема автоматизации многономенклатурного производства?
2. Что отличает гибкие многономенклатурные производства от традиционных автоматических линий?
3. В чем состоят резервы повышения производительности механообработки при их автоматизации и компьютеризации?
4. В чем заключается блочно-модульный принцип построения оборудования для автоматизированного многономенклатурного производства?
5. Какова общая структура современных гибких производственных систем?

6. Каковы разновидности современных гибких производственных систем?

7. Что является информационной базой для управления гибкой производственной системой?

8. Какие основные функции должна выполнять система управления современной ГПС?

9. Каковы области применения в современном производстве основных типов гибких производственных систем?

10. Как в современных производственных системах осуществляется групповая технология обработки?

11. Как сочетаются промышленные роботы с различными станками?

12. Какое специальное и вспомогательное технологическое оборудование и оснастка применяются в современных гибких производственных системах?

13. Какие функции должны выполняться при взаимодействии системы управления современным производством с персоналом?

14. На каких уровнях управления производством применяются автоматизированные рабочие места?

15. Какой информацией обменивается персонал с системой управления производством через АРМ?

16. Что понимается под промышленным роботом?

17. На какие группы делятся промышленные роботы?

18. Как определяется экономическая целесообразность применения промышленных роботов?

19. Как классифицируются комплексы «робот — станок»?

20. Какие функции выполняются роботами различных типов в составе робототехнических систем?

21. На какие разновидности делятся по выполняемым функциям системы управления промышленными роботами?

22. Какие функции решаются с помощью программируемых логических контроллеров в системах управления промышленными роботами?

23. Какие цели преследуют при создании и применении современных систем автоматизированного программирования?

24. Каковы характерные особенности АПТ-образных систем автоматизированного программирования и их отечественного аналога — системы ТЕХТРАН?

25. Что такое интегрированная автоматизированная система управления?

26. Какие устройства располагаются на нижнем уровне современных интегрированных систем?

27. Как вводятся и идентифицируются данные о фактическом ходе современного многономенклатурного производства?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация процессов машиностроения / Под ред. А. И. Дащенко. — М.: Высш. шк., 1991. — 480 с.

2. *Брон Л. С. и др.* Конструкция и наладка автоматических линий и специальных станков. — М.: Высш. шк., 1977. — 359 с.

3. *Волчкевич Л. И., Кузнецов М. М., Усов Б. А.* Автоматы и автоматические линии: В 2 ч. — М.: Высш. шк., 1976.

4. *Герц Е. В., Крейнин Г. В.* Расчет пневмоприводов. — М.: Машиностроение, 1975. — 272 с.

5. *Гжиров Р. И., Серебреницкий П. П.* Программирование обработки на станках с ЧПУ. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. — 588 с.

6. Гибкие производственные системы Японии / Под ред. Л. Ю. Лищинского. — М.: Машиностроение, 1989. — 260 с.

7. *Горохов В. А.* Технология обработки материалов. — Минск: Беларуская навука, 2000. — 439 с.

8. *Грувер М., Зиммерс Э.* САПР и автоматизация производства. — М.: Мир, 1987. — 528 с.

9. *Гурий Ф. В., Клепиков В. Д., Рейн В. В.* Технология автотракторостроения. — М.: Машиностроение, 1981. — 339 с.

10. *Дащенко А. И., Белоусов А. П.* Проектирование автоматических линий. — М.: Высш. шк., 1983. — 328 с.

11. *Иващенко Н. Н.* Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. — М.: Машиностроение, 1978. — 736 с.

12. Использование промышленных роботов в механообработке. — ЭНИМС, 1976.

13. *Карданская И. Л., Чудаков А. Д.* Системы управления производством: анализ и проектирование. — М.: Русская деловая литература, 1990. — 240 с.

14. *Келим Ю. М.* Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. — М.: Высш. шк., 1991. — 304 с.

15. *Ковшов А. Н.* Технология машиностроения. — М.: Машиностроение, 1987. — 320 с.

16. *Колесов И. М.* Основы технологии машиностроения. — М.: Машиностроение, 1997. — 592 с.

17. *Корсаков В. С.* Основы технологии машиностроения. — М.: Машиностроение, 1977. — 413 с.

18. *Кулаичев А. П.* Компьютерный контроль процессов и анализ сигналов. — М.: Информатика и компьютеры, 1999. — 330 с.

19. *Маталин А. А.* Технология машиностроения. — Л.: Машиностроение, 1985. — 496 с.

20. Микропроцессорные системы автоматического управления / Под ред. В. А. Бесекерского. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. — 365 с.

21. Проектирование гибких производственных систем механической обработки деталей. — М.: НПО «Оргстанкинпром», 1986.

22. *Проников А. С.* Металлорежущие станки и автоматы. — М.: Машиностроение, 1981. — 479 с.

23. *Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В.* Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. — М.: Машиностроение, 1985. — 536 с.

24. Теория автоматического управления / Под ред. А. А. Воронова. Ч. 1. — М.: Высш. шк., 1977. — 303 с.

25. Транспортные устройства автоматических линий из агрегатных станков. — М.: НИИМАШ, 1976.

26. *Турин Ф. В., Турин М. Ф.* Технология машиностроения. — М.: Машиностроение, 1986. — 296 с.

27. *Турчин А. М. и др.* Электрические измерения неэлектрических величин. — М.: Высш. шк., 1977. — 547 с.

28. *Цейтлин Л. С.* Электропривод, электрооборудование и основы управления. — М.: Высш. шк., 1991. — 304 с.

29. *Чудаков А. Д.* Системы управления гибкими комплексами механообработки. — М.: Машиностроение, 1990. — 240 с.

30. *Чудаков А. Д., Фалевич Б. Я.* Автоматизированное оперативно-календарное планирование в гибких комплексах механообработки. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.

31. *Шаумян Г. А.* Комплексная автоматизация производственных процессов. — М.: Машиностроение, 1973. — 637 с.

32. Энциклопедия машиностроения. Т. 4. — М.: Машиностроение, 1999. — 864 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава 1. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ 4

1.1. Изделие и его элементы 4
1.2. Производственные и технологические процессы 5
1.3. Структура технологического процесса 5
1.4. Трудоемкость и станкоемкость процесса 6
1.5. Классификация технологических процессов 7
1.5.1. Технологические процессы и типы производства 7
1.5.2. Методы производств 9
1.5.3. Концентрация и дифференциация технологического процесса 11
1.6. Выбор оптимального варианта концентрации технологических процессов 15
1.6.1. Критерии выбора 15
1.6.2. Методы выбора варианта концентрации 19

Глава 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ 22

2.1. Роль и значение автоматизации 22
2.2. Автоматизация производственных и технологических процессов 23
2.3. Уровни автоматизации производственных процессов 24
2.4. Современные черты автоматизации производства машин 26
2.5. Основные направления развития автоматизации производства 27
2.5.1. Технологичность конструкций изделий и автоматизация производства 28
2.5.2. Типы автоматических линий 32

Глава 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАШИН 45

3.1. Системы автоматического управления 45
3.1.1. Элементы систем автоматического управления 51
3.2. Первичные преобразователи (датчики) 59
3.2.1. Свойства и разновидности измерительных преобразователей 61

3.2.2. Измерительные цепи 64
3.2.3. Контактные резистивные преобразователи 69
3.2.4. Реостатные и потенциометрические преобразователи 69
3.2.5. Электромагнитные первичные преобразователи 72
3.2.6. Емкостные первичные преобразователи 77
3.2.7. Пьезоэлектрические преобразователи 81
3.2.8. Тензометрические преобразователи 83
3.2.9. Оптические преобразователи 86
3.2.10. Тепловые преобразователи 94
3.2.11. Терморезисторы 99
3.3. Усилители 105
3.3.1. Электронные усилители 106
3.3.2. Магнитные усилители 108
3.3.3. Электромашиннные усилители 111
3.3.4. Гидро- и пневмоусилители 111
3.4. Корректирующие устройства 115
3.5. Переключающие устройства и распределители 117
3.5.1. Электромагнитные реле 117
3.5.2. Электромеханические муфты 122
3.5.3. Логические элементы 125
3.6. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи 129
3.7. Задающие устройства 132
3.8. Исполнительные устройства 133
3.8.1. Управляемые исполнительные электродвигатели постоянного тока 134
3.8.2. Двигатели переменного тока 136
3.8.3. Электромагниты 139
3.8.4. Синхронные шаговые двигатели 140
3.8.5. Гидравлические серводвигатели 142
3.8.6. Пневматические серводвигатели 144
3.9. Исполнительные механизмы 145
3.9.1. Электропривод 147
3.9.2. Гидропривод 148
3.9.3. Пневмопривод 148
3.10. Системы автоматического регулирования 149
3.10.1. Регуляторы 151
3.10.2. Средства управления 153
3.10.3. Микропроцессоры и ЭВМ в системах управления 158
3.10.4. Устройства сопряжения ЭВМ с объектом управления ... 163
3.11. Программное обеспечение систем управления 166
3.11.1. Математическое обеспечение ЭВМ 167
3.11.2. Алгоритмы 167
3.11.3. Операционная система 170
3.11.4. Программы 171
3.11.5. Программируемые логические контроллеры 174
3.11.6. Системы числового программного управления 177

Глава 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ И РОБОТОТЕХНИКИ 189

4.1. Технологические предпосылки автоматизации на базе гибких производственных систем и робототехники 189

4.2. Современные гибкие производственные системы 197

4.3. Гибкие производственные системы с применением промышленных роботов 220

4.4. Автоматизированные рабочие места 227

4.5. Роботизация промышленных производств 230

4.6. Робототехнические системы 234

4.7. Системы управления промышленными роботами 239

4.8. Визуализация и идентификация грузоединиц 246

Список литературы 251