

62-52  
016  
Общепрофессиональные  
дисциплины

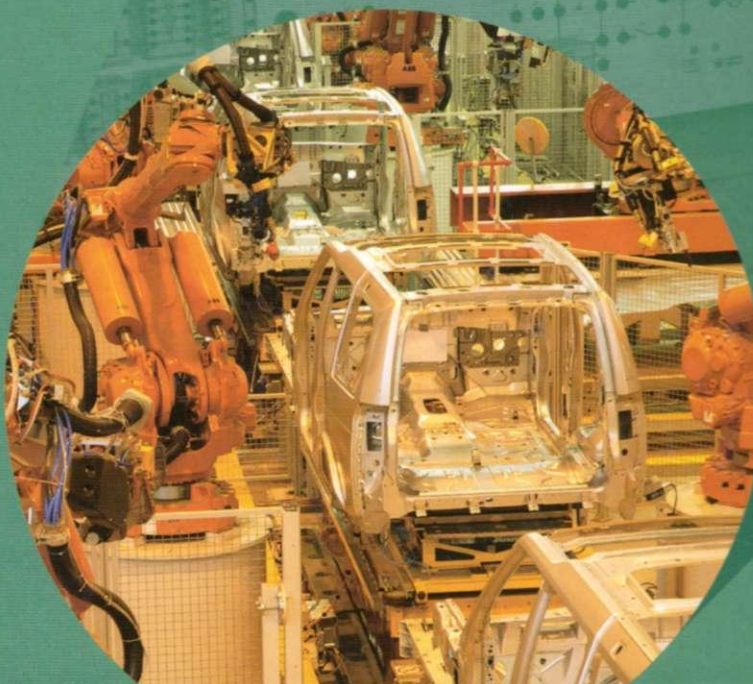


Профессиональное образование

В. Н. Пантелеев  
В. М. Прошин

# ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Учебник



62-52  
716

**ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

---

В. Н. ПАНТЕЛЕЕВ, В. М. ПРОШИН

# ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

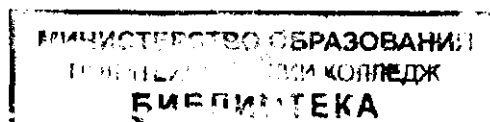
**Учебник**

*Рекомендовано  
Федеральным государственным автономным  
учреждением «Федеральный институт развития  
образования» (ФГАУ «ФИРО»)  
в качестве учебника для использования  
в учебном процессе образовательных учреждений,  
реализующих программы начального  
профессионального образования*

*Регистрационный номер рецензии 508  
от 23 декабря 2011 г. ФГАУ «ФИРО»*

7-е издание

7-е издание, исправленное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2015

УДК 303.06(075.32)  
ББК 73я722  
П166

Рецензенты:  
преподаватель специальных дисциплин высшей  
квалификационной категории ГБОУ СПО «Колледж автоматизации  
и радиозлектроники № 27 им. П. М. Вострухина» *М. В. Галакина*;  
заместитель начальника отдела инжиниринга и конструкторских  
разработок управления технического обслуживания и ремонта  
ОАО «Московский подшипник» *В. С. Шехтман*;  
преподаватель специальных дисциплин высшей квалификационной  
категории ГОУ СПО «Колледж автоматизации и радиозлектроники № 27  
им. П. М. Вострухина» *А. И. Грачев*

97937

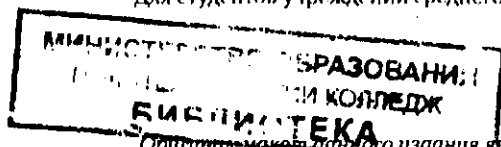
**Пантелеев В.Н.**

П166 Основы автоматизации производства : учебник для студ.  
учреждений сред. проф. образования / В.Н.Пантелеев,  
В.М.Прошин. — 7-е изд., испр. — М. : Издательский центр  
«Академия», 2015. — 208 с.  
ISBN 978-5-4468-2513-4

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной  
дисциплины «Основы автоматизации производства» для всех профессий  
технического профиля.

Рассмотрены общие подходы и методы автоматизации технологических  
процессов. Приведены принципы построения автоматизированных систем  
управления технологическими процессами и средства, с помощью которых  
они реализуются.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.



УДК 303.06(075.32)  
ББК 73я722

Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение  
любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Пантелеев В.Н., Прошин В.М., 2008  
© Пантелеев В.Н., Прошин В.М., 2015, с исправлениями  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2015  
ISBN 978-5-4468-2513-4 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2015

## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по общепрофессиональной дисциплине «Основы автоматизации производства».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают в себя традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включены терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время, когда в производстве используется все больше средств автоматизации и появляются не только полностью автоматизированные цеха, но и предприятия, вопросы «сотрудничества» человека и машины приобретают первостепенное значение.

Изучение дисциплины «Основы автоматизации производства» формирует у учащихся современные взгляды и подходы к процессу производства, немислимому в настоящее время без участия машин, в которых в той или иной степени присутствует интеллект. Эти машины все больше берут на себя функции, ранее свойственные только человеку как участнику производственного процесса, — от выполнения простейших операций до решения сложных вопросов оперативного руководства.

Сегодня необходимо иметь представление о системе «человек — машина», возможном распределении ролей в этой системе, функциях машин. При таком подходе не имеет особого значения характер автоматизируемых процессов, так как он выражает уже конкретное применение общих принципов создания и функционирования системы «человек — машина», которые являются единими для любых производственных и технологических процессов и всех отраслей производства.

В данном учебнике концентрируется внимание на смысле и специфике передачи машине функций, выполняемых человеком, на особенностях и тенденциях этого процесса. Рассматривается не то, *что* автоматизировать, а то, *как* автоматизировать.

При написании данного учебника авторами использовался многолетний опыт преподавания автоматизации производства в Профессиональном колледже № 50 г. Москвы, а также практический опыт по созданию и внедрению систем автоматизации крупных исследовательских установок и производственных участков.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Вспоминается рассказ одного нашего инженера, побывавшего в Японии в командировке еще в 80-е гг. XX в. Случилось так, что первый свой визит на один из крупнейших заводов он совершил в позднее время. В сопровождении японского коллеги они подошли к дверям цеха и, когда хозяин гостеприимно распахнул их перед гостем, последний замер на месте в мистическом ужасе: в полной темноте в огромном помещении ворочалось, шуршало, вздыхало, посвистывало, подмигивало огромное механическое чудовище. С минуту гость стоял в оцепенении. Наконец, на его вопросительный взгляд японец пояснил, кланяясь и улыбаясь:

— Это гибкое автоматизированное производство. За ним наблюдает вон тот оператор.

Вдали на возвышении ярко светилось окно, в котором угадывалась фигура человека.

— А почему в полной темноте-то? — спросил гость.

— А зачем роботам свет? Они прекрасно «видят» все, что им нужно, — опять с улыбкой ответил хозяин.

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Автоматизация производства базируется на законах кибернетики.

*Кибернетика* — наука, изучающая системы и методы управления, причем управления чем угодно: машинами, живыми организмами, обществом. Законы управления в живой и неживой природе одни и те же. Общие закономерности развития нашей страны в период перехода от социализма к капитализму, оказывается, в сущности не отличаются от закономерностей раскрутки электродвигателя после подачи напряжения или изменения состояния организма космонавта, осваивающего после выхода на орбиту состояние невесомости.

*Автоматика* — раздел кибернетики, изучающий теорию и методы автоматизации производственных процессов.

В данном учебнике рассматриваются следующие вопросы: что такое автоматизация производства, зачем она нужна, с чего она начинается, как она осуществляется, какие технические средства для нее требуются, как они устроены и как работают, как их объединить в единую автоматическую систему и как ею управлять? Рассмотрим понятия «производство» и «автоматизация».

Существуют разные подходы к определению производства — с экономических, технических и социальных позиций. В современном понимании в общем виде *производство* — это процесс создания материальных и нематериальных благ и услуг, необходимых для существования и развития общества.

Производство можно подразделить на несколько категорий:

- добывающее производство, обеспечивающее добычу сырья из природных запасов (разработка недр, рыболовство и т. д.);
- сельскохозяйственное производство, связанное с воспроизводством животных и растительных продуктов с участием самой природы (растениеводство, животноводство и т. д.);
- обрабатывающая промышленность, занимающаяся переработкой сырья в нужные человеку изделия;
- транспортные и торговые услуги, суть которых можно свести к перемещению сырья и продукции от производителя к потребителю.

Соответственно процессы добычи, производства, создания, обработки, преобразования и перемещения сырья и готовой продукции можно назвать процессами производства, или *производственными процессами*.

В последнее время существенно выросла доля нематериального производства, связанного с умственной деятельностью человека. Поэтому под *продукцией* производства можно понимать все то, что изготавливается, добывается, перемещается и создается — это могут быть как материальные, так и духовные ценности: сырье, материалы, изделия, энергия, экономическая и другая информация, произведения искусства, компьютерные программы и игры и многое другое, что является результатом человеческого труда.

Если все многообразие производственных процессов сгруппировать по основным действиям, составляющим суть этих процессов, то такими действиями могут быть создание, накопление, преобразование и транспортирование. Эти действия могут производиться над веществом, энергией и информацией. Если объектом воздействия

является информация, то процессы называются информационными, а если вещество и энергия — то технологическими (ТП).

*Технологические процессы* — это процессы создания, накопления, преобразования и транспортирования материалов, изделий и энергии.

Такое определение технологических процессов является довольно общим, абстрактным, но именно эта отвлеченность от конкретной специфики различных производств позволяет показать единство подхода к автоматизации всех этих существенно отличающихся друг от друга производств.

Участие человека в производственных процессах, его труд является решающим фактором — без этого участия никакое производство в принципе невозможно. Однако формы участия человека в производстве могут быть разными и степень этого участия имеет прямое отношение к изучаемому нами предмету.

*Автоматизация* — это применение в производстве технических средств, методов и систем управления, освобождающих человека от непосредственного участия в производственных процессах.

В этом определении есть очень важное уточнение: речь идет об освобождении именно от непосредственного участия, т. е. от выполнения самим человеком действий, из которых состоит производственный процесс. Человек, обладая разумом, способен создать машины, которые будут выполнять за него эту работу, причем не только физическую, но и умственную.

Цель автоматизации заключается в повышении производительности и эффективности труда, улучшении качества продукции и условий трудовой деятельности человека.

Автоматизация — одно из основных направлений научно-технического прогресса. Автоматизируются процессы добычи и обработки материалов, сборочные, энергетические, транспортные и другие технологические процессы, а также процессы проектирования объектов и сооружений, планирования и управления предприятиями и организациями, научные исследования, медицинское диагностирование, программирование, инженерные расчеты и др.

Роль человека в этих процессах и на разных их этапах различна. Главная черта человека — способность разумно мыслить. Можно создать механизм, который будет поднимать груз в 1 000 раз больший, чем может поднять человек, или сделать устройство, которое будет в 100 раз быстрее пришивать пуговицы, но пока еще не существуют машины, способной хотя бы приблизиться к человеку в способности мыслить.



Поэтому освобождение человека от участия в производстве наиболее эффективно там, где мыслительные способности человека используются меньше всего, — в сфере тяжелого физического труда, а также труда монотонного и однообразного, вызывающего умственное утомление. Оно эффективно и в непрерывных производствах, так как заменяющие человека машины не требуют перерывов на обед и могут работать круглосуточно без выходных и отпусков. Оно необходимо там, где нужна быстрота реакции, не доступная человеку, и там, где человеку находиться просто опасно.

Такие виды нематериального производства, как проектирование, программирование, организация и управление предприятиями, сфера образования, искусства, гораздо в большей степени опираются на мыслительную деятельность человека. Здесь без непосредственного участия человека, полного или частичного, не обойтись. Конечно, и здесь есть процессы, от которых человека стоит освободить (например, создание баз данных, поиск документов и т. д.), но в целом это, скорее, не исключение человека из производственного процесса, а помощь тем, кто занят в этих сферах трудовой деятельности.

Особенно важно, в первую очередь, освобождение человека от непосредственного участия в процессах именно материального производства, т. е. в технологических процессах. Это направление автоматизации, т. е. автоматизацию технологических процессов, мы и будем рассматривать.

Технологические процессы реализуются с помощью оборудования, которое тоже называется технологическим. Для того чтобы процесс протекал так, как запланировано, этим оборудованием надо *управлять*, т. е. воздействовать на него по определенным правилам.

Совокупность технологического оборудования, реализующего ТП, является *объектом управления*. Таким объектом может быть и автомобиль с его оборудованием — рулевым управлением, тормозами и коробкой передач, которыми управляет водитель, и самолет, где управление может быть поручено автоматическому устройству — автопилоту, и металлургический завод с практически полностью автоматизированными цехами.

Любой технологический процесс организуется для достижения какой-то цели, получения конечной продукции. Для обеспечения высокого качества этой продукции необходимо контролировать как ход ТП, так и работу самого технологического оборудования. Это можно сделать, только собрав всестороннюю информацию.

Протекание ТП и состояние оборудования в каждый момент времени характеризуются различными физическими величинами: температурой, давлением, перемещением, скоростью, ускорением,

расходом жидкостей и газов, электрическим напряжением, силой тока и т. д. Эти величины называются *технологическими параметрами*. В ходе технологического процесса и работы оборудования значения этих величин непрерывно меняются. Для осуществления контроля оператор, ведущий процесс, должен получать сведения о значении технологических параметров и об их изменении в удобном для него виде, т. е. со всеми необходимыми обобщениями, анализами и прогнозами. Таким образом, *контроль* включает в себя сбор, обработку, анализ и выдачу оператору информации о ТП и работе оборудования.

Полученная в процессе контроля информация используется для воздействия на технологическое оборудование с целью обеспечения протекания ТП в полном соответствии с запланированным его ходом, т. е. для управления технологическим процессом.

*Автоматизация технологических процессов* — это применение технических средств, методов и систем управления для сбора, обработки, анализа и выдачи информации о технологических параметрах и воздействия по результатам анализа на технологический процесс.

## 1.2.

### СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

---

Любая система представляет собой совокупность находящихся во взаимной связи частей этой системы. Мы рассматриваем системы, способные осуществлять автоматизацию технологических процессов, т. е. собирать, обрабатывать и анализировать информацию, характеризующую состояние ТП, выводить ее оператору, а также через оператора или самостоятельно осуществлять управляющие воздействия на ТП. Очевидно, это должен быть набор технических средств, взаимодействие которых должно происходить по определенным законам так, чтобы обеспечить запланированное протекание технологического процесса. Такую систему называют автоматизированной, или автоматической, системой управления технологическим процессом.

*Автоматизированная (автоматическая) система управления технологическими процессами (АСУ ТП)* — это совокупность технических средств и методов сбора, обработки, анализа и выдачи информации и воздействия на ТП, которые во взаимодействии с человеком и (или) между собой обеспечивают запланированное протекание технологического процесса.

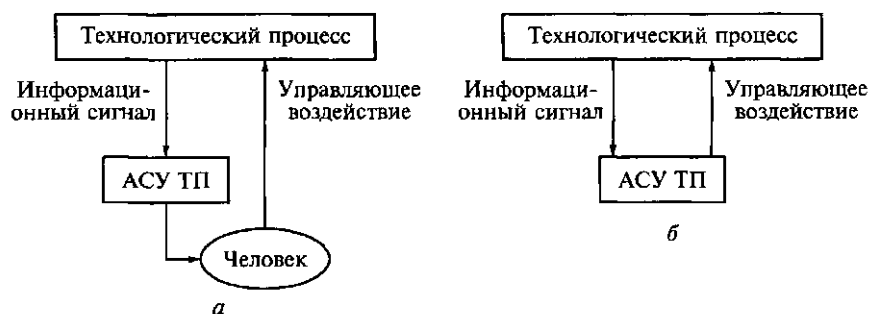


Рис. 1.1. Автоматизированная (а) и автоматическая (б) системы управления

Различие между автоматизированной и автоматической системами управления связано с распределением задач между человеком и техническими средствами.

Если принятие и реализация решения о воздействии на ТП по результатам анализа информации о технологических параметрах производится человеком, то такая система управления называется *автоматизированной* (рис. 1.1, а). В такой системе человек получает информацию о технологических параметрах и результаты ее анализа в виде сообщений, таблиц и графиков на экране дисплея и через другие средства аудиовизуального представления информации. Часто система рассчитывает на основе этих данных рекомендуемые значения управляющих воздействий на ТП, однако решение вопроса об использовании этих рекомендаций остается за человеком. С одной стороны, человек может быть источником ограничений: иногда он не может принять быстрого решения, а иногда может принять неправильное решение.

С другой стороны, включение человека в систему управления ТП позволяет избежать аварийных ситуаций при выходе из строя каких-либо элементов системы управления, так как человек может выбрать и принять необходимое решение и продолжить технологический процесс даже при отсутствии части информации (на помощь приходят опыт, квалификация и интуиция). Например, выход из строя датчика температуры в системе аварийной защиты, отключающей технологическое оборудование, может быть воспринят человеком (оператором) как информация к размышлению: оценив ситуацию, он может и не прерывать процесс, если остальные параметры находятся в норме.

Если система управления по результатам анализа информации сама принимает и реализует решение о воздействии на ТП, то такая

система называется *автоматической*, или системой с замкнутой обратной связью (рис. 1.1, б). Такая система управления соединена с объектом управления не только на входе, где она получает информацию о технологических параметрах, но и на выходе, где она создает управляющие воздействия на технологический процесс. Человек не принимает непосредственного участия в управлении и является лишь наблюдателем, готовым вмешаться в аварийных ситуациях.

Хотя в автоматических системах управления всегда есть программы обработки аварийных ситуаций, интеллект человека, с одной стороны, всегда выше интеллекта машины и он может предвидеть развитие событий, не доступное машинному анализу. С другой стороны, скорость реагирования системы на аварийную ситуацию может быть намного выше скорости реакции человека. Трагическим результатом отстранения системы защиты от слежения за ситуацией является авария на атомной электростанции в Чернобыле в 1986 г.

Как было сказано ранее, сбор, обработка и анализ информации о ТП и работе оборудования относятся к сфере контроля. Рассмотренное включение человека в систему управления происходит на этапе принятия решения по результатам анализа, т. е. уже по результатам контроля. Поэтому та часть технических средств системы управления, которая выполняет операции контроля, работая без вмешательства человека, может быть рассмотрена как отдельная автоматическая система контроля (АСК). Когда говорят об автоматизированной или автоматической системе управления, всегда подразумевают наличие в ее составе АСК.

Кроме систем контроля и управления есть еще одна разновидность автоматических систем. Она связана с частным случаем управления, имеющим целью поддерживать постоянство или изменение по заданному закону какого-то одного технологического параметра. Эта разновидность управления называется *регулированием*, и реализует ее система автоматического регулирования (САР).

Реальные АСУ ТП являются комбинированными, т. е. одни технологические параметры поддерживаются с помощью САР, другие отслеживаются техническими средствами самой АСУ, в состав которой входит и АСК.

### **1.3. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Ни один из процессов создания, преобразования или транспортирования продукции не может происходить без управления. На первых порах производственными процессами полностью управлял сам

человек. По мере усложнения процессов требовалось более сложное управление и возможности человека становились ограничивающим фактором. Были разработаны способы измерения параметров процессов (температуры, давления, расхода и других величин) и соответствующие устройства — датчики, а также исполнительные механизмы, оказывающие необходимое воздействие на процесс.

Датчики и исполнительные механизмы — два главных элемента системы управления. Но есть еще один очень важный фактор, без которого управление неосуществимо, — это решение. Измеренное значение температуры или давления не может быть непосредственно использовано для приведения в движение исполнительного механизма. Однако его можно использовать для проведения анализа, на основании которого принимается решение и осуществляется управляющее воздействие.

Пока не было вычислительных устройств, величину управляющего воздействия выбирал сам оператор. Опыт помогал ему определять, например, насколько надо изменить положение вентиля, когда измеряемый параметр достигает уровня, при котором становится необходимым воздействие на процесс. Он считывал с приборов результаты измерений, производил приближенные вычисления, принимал решение и оказывал управляющее воздействие.

Однако по мере усложнения процессов даже самый квалифицированный оператор перестал справляться с задачами управления. Был разработан аналоговый регулятор, который самостоятельно осуществлял непрерывное регулирование одного параметра. Но при большом числе параметров в одном процессе требовалось много регуляторов, которые не могли взаимодействовать между собой и вести себя как единое целое. По-прежнему оператор должен был принимать решения по управлению всем процессом, даже если регуляторы обеспечивали хорошее регулирование своих параметров.

Задача существенно облегчалась, если каждая операция технологического процесса оставалась неизменной в течение длительного времени, например при массовом производстве одних и тех же изделий.

Уже на рубеже 30 — 40-х гг. XX в. в России появились автоматические линии для обработки деталей подшипников, а в конце 40-х гг. XX в. у нас впервые в мировой практике было создано комплексное производство поршней для тракторных двигателей с автоматизацией всех процессов — от загрузки сырья до упаковки готовой продукции.

Появление электронных вычислительных машин (ЭВМ) позволило рассматривать технологический процесс не как набор независимых

операций, а как единое целое. АСУ на базе ЭВМ ведут весь процесс в оптимальном режиме, выполняют пуск и останов технологического оборудования, контролируют его состояние и предотвращают перегрузки, обеспечивают отработку аварийных ситуаций, ведут учет и анализ протекания процесса; они легко перестраиваются при необходимости на выпуск другой продукции.

Современные промышленные объекты представляют собой совокупность взаимосвязанных многорежимных управляемых подсистем, объединенных общей системой управления с центральной ЭВМ. Производственные процессы осуществляются на автоматических линиях гибкими производственными модулями на базе минимизированных вариантов ЭВМ — микропроцессоров и микроЭВМ. Гибкими их называют потому, что они способны быстро перестраиваться с производства одних изделий на производство других, что позволяет постоянно модифицировать производство, расширять ассортимент и повышать качество продукции. Вспомогательные операции и часть основных операций выполняются промышленными роботами. Все это оборудование совместно с автоматическими системами транспортирования, проектирования и подготовки производства образует *гибкое автоматизированное производство*.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Что изучает кибернетика?
2. Чем занимается автоматика?
3. Какие процессы называются технологическими?
4. Что такое автоматизация?
5. В чем заключается автоматизация технологических процессов?
6. Что такое АСУ ТП?
7. В чем отличие автоматизированной системы управления от автоматической?
8. Человек в автоматизированной системе управления — это хорошо или плохо?
9. Какие виды автоматических систем вы знаете?
10. Перечислите главные элементы системы управления.
11. Какова роль вычислительного устройства в системе управления?
12. Дайте характеристику гибкого автоматизированного производства.

# АЛГОРИТМЫ

Автоматизация производства позволяет освободить человека от непосредственного участия в производственных процессах, переложив их выполнение на плечи технических средств. Но для того чтобы «научить» их выполнению какой-либо работы, человеку надо сначала тщательно изучить эту работу самому, осознать цель работы — что именно должно получиться в результате ее выполнения, представить себе до мелочей каждое действие, понять, от каких условий и как оно зависит, и подробно описать порядок выполнения действий.

Современные технические средства во многом превосходят человека — они могут выполнять различные действия быстрее и точнее, создавать большие усилия, работать без усталости, не совершая ошибок продолжительное время. Но каждое действие, даже самое простое (например, вернуться в исходное положение), они могут выполнить только по команде человека.

Следовательно, автоматизацию любого процесса надо начинать с подробного перечня действий, из которых состоит процесс. Такой перечень составляется и записывается по определенным правилам, которые и будут рассмотрены в этой главе.

### 2.1. ПОНЯТИЕ АЛГОРИТМА

Каждый из нас ежедневно совершает множество действий, не задумываясь о том, как именно мы их совершаем. Мы делаем покупки, пользуемся общественным транспортом, ходим в кино, готовим еду и т. д.

Мы действуем автоматически и обычно получаем именно тот результат, к которому стремились.

**Пример 1.** Предположим, что вы проголодались и хотите съесть бутерброд. Что вам для этого нужно сделать?

Сначала вам придется заглянуть в хлебницу и холодильник, чтобы взять там хлеб и масло. Вы не будете намазывать масло на хлеб прямо в холодильнике — значит, вам надо будет отнести продукты на стол. Затем вы возьмете нож и отрежете кусок хлеба и немного масла. Потом вы намажете масло на хлеб и получите готовый бутерброд. Последовательность ваших действий:

1. Открыть хлебницу.
2. Взять хлеб.
3. Закрыть хлебницу.
4. Положить хлеб на стол.
5. Открыть холодильник.
6. Взять масло.
7. Закрыть холодильник.
8. Положить масло на стол.
9. Взять нож.
10. Отрезать кусок хлеба.
11. Отрезать немного масла.
12. Намазать масло на хлеб.
13. Положить нож на место.
14. Съесть бутерброд.

Изготовление бутерброда — ваша цель. Для ее достижения вы совершаете несколько действий, причем в строго определенной последовательности. Вы не сможете взять масло, не открыв холодильник, или отрезать кусок хлеба, не достав хлеб из хлебницы. Попробуйте пропустить хотя бы одно действие или перепутать порядок действий — вы или сильно осложните продвижение к цели, или вообще останетесь без бутерброда.

**Пример 2.** Вы получили домашнее задание — решить задачу по математике.

Сначала вам придется найти задачу в учебнике, потом записать условие задачи, подобрать нужную формулу, заменить в ней буквы на числа из условия и выполнить вычисления. Последовательность ваших действий:

1. Подойти к столу.
2. Взять учебник.
3. Найти в учебнике заданную задачу.
4. Записать условие задачи.
5. Подобрать нужную формулу.
6. Внести в формулу данные из условия.
7. Произвести вычисления.
8. Записать ответ.



Вы не можете записать условие задачи, если вы не нашли задачу в учебнике. Вы не можете выполнить вычисления, если вы еще не подобрали нужную формулу. Указанная выше последовательность действий должна быть соблюдена очень строго, только тогда она приведет вас к поставленной цели — решению задачи. Любые изменения в этой последовательности лишат вас возможности достичь намеченной цели.

**Алгоритм** — это последовательность действий, ведущих к достижению цели.

Когда вы рассказываете кому-нибудь, как отремонтировать велосипед, сварить суп или подготовиться к рыбалке, вы сообщаете последовательность действий, которые при точном их выполнении приведут к желанной цели.

Если в этой последовательности есть сложное действие (например, снять колесо велосипеда), то вы в зависимости от опыта вашего собеседника можете или назвать это действие целиком, или разбить его на ряд более простых действий (ослабить левую гайку, затем ослабить правую гайку и т. д.). При составлении алгоритмов сложные действия часто разбиваются на более простые, вплоть до самых элементарных. Например, в примере 2 действие 2. *Взять учебник* можно описать следующим образом:

1. *Протянуть руку к учебнику.*
2. *Взять учебник.*
3. *Поднести учебник к себе.*

Можно это же действие описать еще подробнее:

1. *Протянуть руку к учебнику.*
2. *Обхватить учебник пальцами.*
3. *Сжать пальцы.*
4. *Поднять руку с учебником над столом.*
5. *Поднести учебник к себе.*

Человеку такая подробная инструкция может показаться смешной, но именно такие действия должен выполнить робот, чтобы перенести какой-либо предмет.

Подробная детализация позволяет самое сложное действие представить как совокупность более простых действий, а выполнение самых простых действий можно поручить машине — это прямой путь к автоматизации.

Разложить технологический процесс на множество действий, которые будут выполнять машины, и разработать алгоритм управления ТП — задача технолога.

Слово «машина» используется здесь в самом широком смысле — как техническое средство, способное выполнять за человека

огромное количество самых разных действий. Причем машины могут выполнять не только чисто физические действия — перемещать что-то в пространстве или обрабатывать с помощью инструментов, но и анализировать, вычислять, оценивать, принимать решения и т. д.

Все эти способности машинам дает человек. Машины в отличие от человека не обладают разумом, поэтому они способны выполнять только элементарные действия, точно соответствующие полученным командам. Если для человека алгоритм — это последовательность действий, то для машины — это последовательность команд, которые ей предстоит распознать и выполнить для достижения цели.

Распознать команду машина сможет только в том случае, если эта команда однозначна и ее различные толкования невозможны. Поэтому для машины каждая команда должна быть записана особым — на понятном машине языке.

Алгоритм, записанный на понятном машине языке, называется программой.

97937

## 2.2. ВИДЫ АЛГОРИТМОВ

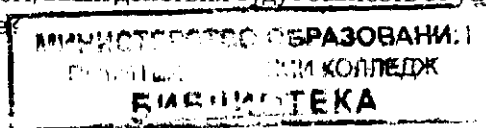
### 2.2.1. Линейные алгоритмы

Алгоритмы, рассмотренные ранее, являются самыми простыми. Они описывают последовательность действий, которые выполняются в том же порядке, в котором записаны, — последовательно, одно за другим. Предполагается, что для выполнения этих действий все подготовлено и в ходе их выполнения вопросов или неожиданных ситуаций не возникнет, т. е. хлеб уже лежит в хлебнице, масло — в холодильнике, учебник — на столе, а от вас требуется только выполнить описанные в алгоритме действия в заданной последовательности.

Алгоритмы, в которых все действия выполняются последовательно, одно за другим, называются *линейными алгоритмами*.

### 2.2.2. Алгоритмы с ветвлением

В реальной жизни не все так просто. Вы захотели съесть бутерброд, открыли хлебницу — а хлеба в ней нет! Что делать? Если очень хочется есть, то придется пойти в магазин, купить хлеб и принести его домой. Таким образом, ваши действия будут зависеть от условия: есть ли хлеб в хлебнице?



В этой ситуации последовательность ваших действий после появления желания съесть бутерброд будет следующей:

1. *Открыть хлебницу.*
2. **Если хлеб есть, то взять хлеб.**
3. *Закрыть хлебницу.*
4. **Если хлеба нет, то пойти в магазин.**
5. *Купить хлеб.*
6. *Принести хлеб домой.*
7. *Положить хлеб на стол и т. д.*

Полужирным шрифтом выделены строки, на которые вам следует обратить особое внимание, — в данном случае в них заданы условия, определяющие ваши дальнейшие действия.

Итак, теперь вы с бутербродом, однако в описании последовательности действий возникла неопределенность. Если строго следовать этому описанию, то несмотря на наличие хлеба в хлебнице и успешное выполнение действия 2. ...*взять хлеб* вам все равно придется идти в магазин, выполняя последовательно действия 3, 4, 5 и 6. Иначе не понятно, что делать после действия 3. *Закрыть хлебницу*. Конечно, вы как человек разумный сообразите, что вам делать. А как быть, если в подобной ситуации окажется машина, которой поручено выполнение алгоритма?

Очевидно, в такой ситуации в описание алгоритма надо внести некоторые уточнения. Во-первых, надо указать, что в какой-то момент последовательность выполнения действий может быть нарушена, и тогда нужно будет сделать выбор очередного действия. Этот выбор будет зависеть от выполнения (или невыполнения) некоторого условия (есть ли хлеб в хлебнице). Во-вторых, надо указать, какими именно должны быть очередные действия как при том, так и при другом результате выбора.

Признаком ситуации выбора служит слово «если», которое вводит условие (*хлеб есть*). Но поскольку хлеба может и не быть, в алгоритме неизбежно еще одно «если», которое вводит противоположное условие (*хлеба нет*). Чтобы не запутаться в этих условиях, второе условие обычно заменяют словом «иначе»:

1. *Открыть хлебницу.*
2. **Если хлеб есть, то взять хлеб.**
3. *Закрыть хлебницу.*
4. **Иначе пойти в магазин.**
5. *Купить хлеб.*
6. *Принести хлеб домой.*
7. *Положить хлеб на стол и т. д.*

Таким образом, главным является первое условие, вводимое словом «если». В зависимости от того, выполнено это условие или

нет, вы переходите либо к действию 3, либо к действиям 4, 5, 6. Эти варианты действий называются *ветвями алгоритма*.

Алгоритмы, в которых производится выбор одного из нескольких вариантов действий в зависимости от выполнения некоторого условия, называются *алгоритмами с ветвлением*, или *условными алгоритмами*.

Где начинается и где заканчивается каждая ветвь? При выполнении условия *Если* последовательность действий в алгоритме продолжается так, как она записана, — ведь никаких оснований для ее нарушения нет. Вы выполняете действия, образующие первую ветвь. Где она заканчивается? Там, где заканчиваются действия, предусмотренные условием *Если*, т. е. перед вторым условием — *Иначе*.

А если условие *Если* не выполнено? Тогда появляются основания для нарушения последовательности действий. После проверки выполнения (точнее, невыполнения) условия *Если* начинается выполнение действий, стоящих в алгоритме после *Иначе*, т. е. действий второй ветви.

Итак, в зависимости от выполнения условия *Если* вы совершаете действия либо первой, либо второй ветви. А дальше — опять не понятно: с какого места продолжать выполнение алгоритма, например, после выполнения действия 3 первой ветви? Вы-то можете догадаться, что следующим в алгоритме должно быть действие 7. *Положить хлеб на стол*, но как в подобной ситуации быть машине? Она-то догадываться не умеет!

Для снятия неопределенности в алгоритм вводят специальный указатель, отделяющий ветви от продолжения алгоритма. Обычно таким указателем является фраза *Конец ветвления*. После завершения действий любой ветви надо отыскать фразу *Конец ветвления* и продолжить выполнение алгоритма с действия, которое следует после этой фразы.

Алгоритм будет выглядеть следующим образом:

1. *Открыть хлебницу.*
2. ***Если хлеб есть, то взять хлеб.***
3. *Заккрыть хлебницу.*
4. ***Иначе пойти в магазин.***
5. *Купить хлеб.*
6. *Принести хлеб домой.*
7. ***Конец ветвления.***
8. *Положить хлеб на стол и т. д.*

Теперь, независимо от того, какая именно ветвь алгоритма была выполнена, очередным будет действие, стоящее после фразы *Конец ветвления* (8. *Положить хлеб на стол*).

Рассмотрим еще один алгоритм с ветвлением. Предположим, что надо произвести сортировку цилиндрических изделий по диаметру и распределить их по двум магазинам (ящикам, коробкам). Изделия поступают с конвейера в устройство, которое измеряет их диаметр, и в зависимости от результатов измерения другое устройство помещает изделие в тот или иной магазин.

Алгоритм сортировки может быть следующим:

1. Установить изделие в измерительное устройство.
2. Измерить диаметр изделия.
3. Если диаметр больше заданного, то поместить изделие в магазин № 1.
4. Иначе поместить изделие в магазин № 2.
5. Конец ветвления.

Исполнителем этого алгоритма может быть как человек, так и машина (например, робот). Если выполнение подобного алгоритма предполагается поручить машине, то нужно быть уверенным, что она не только поймет каждую команду, но и сумеет сделать выбор, т. е. машина должна иметь технические средства, способные определить, выполнено ли условие *Если*. В нашем случае машина должна не только измерить диаметр изделия, но и сравнить его с заданным диаметром и по результатам сравнения принять решение о помещении изделия в нужный магазин.

В автоматических системах, работающих без участия человека, при возникновении различных ситуаций машине приходится самой принимать решение о выборе варианта действий, поэтому в таких системах часто используются алгоритмы с ветвлением. Любую ситуацию, в которой нужно выбирать один из двух или нескольких вариантов действий, всегда можно свести к одному или нескольким ветвлениям алгоритма.

### 2.2.3. Циклические алгоритмы

Часто мы наблюдаем или участвуем в процессах, в которых много раз подряд выполняются одни и те же действия. Например, рассмотрим, как работает продавец в магазине. Каждого покупателя он обслуживает по одной схеме: выдать товар — получить деньги — выбить чек — дать сдачу. Меняются только вид и количество товаров. Контролер в кинотеатре работает по схеме: взять билет — проверить сеанс — оторвать контроль — вернуть билет. И так сотни раз в течение дня. Многократно повторяют одни и те же действия грузчик, разгружающий машину с продуктами; рабочий на конвейере; маляр,

оклеивающий комнату обоями; и вы сами, когда пьете чай или отправляетесь утром на занятия.

Вернемся к рассмотрению алгоритма сортировки изделий. В этом алгоритме описаны однократные действия, производимые с одним изделием. Оно отправлялось в магазин № 1 или № 2, и на этом алгоритм заканчивался. Но реальные изделия поступают на сортировку, скорее всего, в большом количестве. Значит, описанные в алгоритме действия должны повторяться вновь и вновь. Как долго? Очевидно, пока изделия имеются на конвейере.

Как изменить алгоритм, чтобы процесс сортировки повторялся многократно? Какие именно действия повторять и до каких пор? Существует два варианта:

- задать условие, при выполнении которого действия нужно повторять, а как только условие будет нарушено — прекратить повторение и перейти к продолжению алгоритма (например, красить доски забора, пока он не закончится, а затем приступить к обеду);
- задать необходимое количество повторений одних и тех же действий (например, налить в бочку 10 ведер воды).

Первый вариант более универсальный — он подходит для забора с любым количеством досок, в том числе и заранее неизвестным. Но исполнитель этого варианта алгоритма должен уметь проверять выполнение заданного условия (закончился ли забор?), что не трудно для человека, но может оказаться трудным для машины.

А вот второй вариант для машины не проблема — механические, электрические, электронные и другие счетчики существуют давно и в самых разных видах. Но этот вариант лишен гибкости, и при изменении условий выполнения алгоритма (например, при замене бочки на меньшую) нужно изменять команды в самом алгоритме (устанавливать другое количество наливаемых ведер).

Повторяющаяся в алгоритме группа действий образует цикл.

Алгоритмы, в которых повторяются одни и те же действия, называются *циклическими алгоритмами*.

Когда условие повторения нарушено или цикл выполнен нужное количество раз, исполнитель алгоритма переходит к дальнейшим действиям, находящимся уже за пределами цикла.

Поскольку в алгоритме сортировки изделий количество изделий заранее неизвестно, воспользуемся **первым вариантом** — попробуем найти условие, выполнение которого необходимо для повторения процесса сортировки. Таким условием является наличие очередного изделия на конвейере. Если сортировку производит

человек, то он легко обнаружит это изделие. Если же исполнитель алгоритма сортировки — машина, то она должна уметь проверять наличие изделия на конвейере. Как машина сможет это сделать, рассмотрим далее. А сейчас дополним алгоритм сортировки условием повторения цикла:

- 1. Пока на конвейере есть изделие, выполнять действия:**
2. Установить изделие в измерительное устройство.
3. Измерить диаметр изделия.
4. Если диаметр больше заданного, то поместить изделие в магазин № 1.
5. Иначе поместить изделие в магазин № 2.
6. Конец ветвления.
- 7. Конец цикла.**

Здесь полужирным шрифтом выделены строки, имеющие отношение к повторению действий, т. е. к циклу. В алгоритме есть и ветвление, но оно записано светлым шрифтом.

Для того, чтобы исполнителю было понятно, какие именно действия нужно повторять, эти действия (цикл) должны быть как-то выделены, т. е. должны быть указаны границы цикла. Так как повторение цикла зависит от выполнения заданного условия *1. Пока на конвейере...*, строка с этим условием может быть одной из границ цикла. Другую границу устанавливают строкой *Конец цикла*. Если условие *1* соблюдено, то выполняются действия *2...6*, расположенные между указанными границами. При нарушении условия *1* исполнителю нужно будет перейти к действию, следующему за строкой *7. Конец цикла* (если имеется продолжение алгоритма).

В рассмотренном алгоритме проверка условия, определяющего необходимость повторения цикла, производилась до начала выполнения самих действий цикла. Но бывает и так, что оценить необходимость повторения цикла можно только по результату, полученному после его выполнения. Выбор того или иного варианта зависит от смысла выполняемых действий.

Например, при погрузке контейнеров в железнодорожный вагон только после погрузки очередного контейнера можно определить, есть ли еще свободное место в вагоне и стоит ли продолжать погрузку. В этом случае строка с условием повторения цикла является его нижней границей, а верхнюю границу устанавливают строкой *Начало цикла*.

Составим циклический алгоритм погрузки контейнеров в вагон:

- 1. Начало цикла.**
2. Поднять краном очередной контейнер.
3. Переместить контейнер к вагону.

*4. Погрузить контейнер в вагон.*

*5. Вернуть кран в исходное положение.*

**6. Пока в вагоне есть свободное место, повторять действия цикла.**

*7. Закрыть и опечатать дверь вагона.*

При выполнении условия 6 будут повторяться действия 2...5, после чего снова будет проверяться выполнение условия 6. Если оно окажется нарушенным, то повторения цикла не будет и исполнитель перейдет к команде 7. *Закрыть и опечатать дверь вагона*, следующей за условием 6.

В этот алгоритм можно ввести и предварительное условие, проверяемое до начала выполнения действий алгоритма. Ведь предназначенных для погрузки контейнеров может не оказаться вообще или их может оказаться недостаточно для заполнения всего вагона, тогда погрузка будет производиться лишь при наличии контейнеров.

В этом случае весь записанный ранее алгоритм будет представлять собой цикл, повторяемый при условии наличия контейнеров, причем проверка выполнения этого условия тоже включается в цикл:

**1. Начало цикла.**

**2. Пока есть контейнер для погрузки, выполнять действия:**

*3. Поднять краном очередной контейнер.*

*4. Переместить контейнер к вагону.*

*5. Погрузить контейнер в вагон.*

*6. Вернуть кран в исходное положение.*

**7. Пока в вагоне есть свободное место, повторять действия цикла.**

**8. Конец цикла.**

При нарушении либо условия 2, либо условия 7 исполнитель переходит к действию, следующему за строкой 8. **Конец цикла.**

Мы рассмотрели два вида циклических алгоритмов: с предварительным условием (предусловием) и с последующим условием (постусловием).

Рассмотрим второй вариант циклических алгоритмов — с заданным заранее количеством повторений. Как уже было сказано, по таким алгоритмам работают исполнители, не умеющие оценивать выполнение (или невыполнение) того или иного условия, но зато умеющие работать с числами.

Например, на химическом предприятии нужно обеспечить автоматическое заполнение жидкостью 10 резервуаров. Счетчик количества повторяющихся операций в исходном состоянии установлен на ноль. Резервуары расположены в один ряд, вплотную друг к другу.



Шланг, из которого вытекает жидкость, может перемещаться вдоль резервуаров и в исходном положении он находится вблизи первого резервуара.

Каждый резервуар имеет датчик, сигнализирующий о его заполнении. Алгоритм заполнения резервуаров может быть следующим:

1. **Начало цикла.**
2. *Переместить шланг на ширину резервуара.*
3. *Открыть вентиль на шланге.*
4. *Проверить наличие сигнала датчика о заполнении резервуара.*
5. *При поступлении сигнала закрыть вентиль.*
6. *Увеличить содержимое счетчика на 1.*
7. **Пока содержимое счетчика меньше 10, повторять действия.**

Это алгоритм с постусловием, так как только после заполнения очередного резервуара определяется, нужно ли повторять операцию заполнения еще раз (т. е. заполнены ли все 10 резервуаров). Но можно составить этот алгоритм и с предусловием:

1. **Пока содержимое счетчика меньше 10, выполнять действия:**
2. *Увеличить содержимое счетчика на 1.*
3. *Переместить шланг на ширину резервуара.*
4. *Открыть вентиль на шланге.*
5. *Проверить наличие сигнала датчика о заполнении резервуара.*
6. *При поступлении сигнала закрыть вентиль.*
7. **Конец цикла.**

В обоих алгоритмах после того, как содержимое счетчика станет равным 10, очередная проверка условия повторения цикла (*Пока содержимое счетчика...*) покажет, что теперь оно уже не выполняется, и исполнитель перейдет к следующему действию 8 (если оно есть в алгоритме).

В двух последних алгоритмах фактически присутствует проверка условия *Если сигнал указателя поступил...* Очередное действие *...закрыть вентиль* выполняется только при ответе «Да», т. е. этот участок алгоритма содержит ветвление. Но так как мы рассматриваем организацию циклов, на которую наличие ветвления внутри цикла не влияет, этот участок алгоритма приведен без излишней детализации.

## 2.2.4. Вспомогательные алгоритмы

Среди множества действий, выполняемых нами ежедневно, немало таких, которые делаются одинаково, хотя и направлены на

достижение совершенно разных целей. Например, мы действуем практически одинаково, покупая хлеб, конфеты, книгу, билет в кино или на поезд.

Алгоритм любых наших покупок может выглядеть следующим образом:

1. Достать кошелек.
2. Взять из кошелька деньги.
3. Дать деньги продавцу.
4. Назвать требуемый товар.
5. Получить товар.
6. Положить товар в сумку (в пакет, в карман и т. д.).
7. Взять сдачу.
8. Положить сдачу в кошелек.

Если все действия в течение дня описать в виде алгоритма, то в нем, скорее всего, ни один раз встретятся эти восемь действий, только название товара будет меняться. Пять покупок, сделанных в этот день, добавят в алгоритм дня 40 строчек. А если покупок 10, то строчек будет 80. Возможно даже, что именно эти строчки составят значительную долю алгоритма дня, хотя их информационная ценность очень мала — фактически 10 раз будет повторяться описание одной и той же последовательности действий.

В этой ситуации удобно выделить алгоритм покупок из алгоритма всего дня и записать его отдельно под заголовком, например, «Покупка X». Тогда в алгоритме дня каждая покупка будет представлена только одной строкой вместо восьми; лишь значение X будет меняться (хлеб, книга и т. д.).

Записав один раз этот алгоритм, его можно вставлять в любой другой алгоритм, описывающий наши действия, если среди этих действий будет покупка чего-либо. Для этого достаточно упомянуть заголовок алгоритма и указать конкретное значение X.

Алгоритмы, целиком и многократно используемые в составе других алгоритмов, называются *вспомогательными алгоритмами*.

Вспомогательные алгоритмы очень удобны при решении математических задач. Например, решение квадратных уравнений или вычисление функции  $\sin x$  с помощью ЭВМ представляет собой длинную цепочку действий. Если все пункты этих алгоритмов каждый раз записывать в основном алгоритме решения задачи, то он становится слишком длинным. Удобнее записать, например, вычисление  $\sin x$  в виде вспомогательного алгоритма, а в основном алгоритме в нужных местах просто сделать ссылки на него.

Для упрощения таких ссылок вспомогательный алгоритм всегда снабжают заголовком, по которому его можно вызвать. После вызова

выполнение основного алгоритма приостанавливается, пока не будет выполнен вспомогательный алгоритм. При этом вспомогательному алгоритму из основного алгоритма передается информация, обработка которой и является задачей вспомогательного алгоритма. Такой информацией может быть, например, значение  $x$  при вычислении  $\sin x$  или название товара при совершении покупки. Результаты выполнения вспомогательного алгоритма передаются в основной алгоритм.

Например, при изготовлении разных изделий может выполняться операция нагрева какой-либо детали или вещества с помощью нагревательного элемента до той или иной температуры. Обозначим эту температуру  $t$ , а алгоритм нагрева назовем «Нагрев до  $t$ ». Он может быть представлен в следующем виде:

**«Нагрев до  $t$ »**

1. Ввести значение  $t$ .
2. Включить нагреватель.
3. Пока температура меньше  $t$ , выполнять действия:
4. Подождать 5 с.
5. Измерить температуру.
6. Конец цикла.
7. Выключить нагреватель.

При выполнении этого алгоритма каждые 5 с измеряется температура и, пока она меньше  $t$ , нагреватель остается включенным. Как только температура достигнет значения  $t$ , условие 3 окажется нарушенным и исполнитель алгоритма перейдет к действию, следующему за строкой 6. Конец цикла, т. е. выключит нагреватель.

Предположим, что имеется основной алгоритм, в котором есть этап нагрева жидкости до  $150^\circ\text{C}$ . В этом случае только что рассмотренный алгоритм *Нагрев до  $t$*  может использоваться как вспомогательный:

1. Налить в резервуар жидкость № 1.
2. Налить в резервуар жидкость № 2.
3. Перемешать жидкости.
4. **Нагрев до  $150^\circ\text{C}$ .**
5. Открыть заслонку и т. д.

Здесь строка 4 означает вызов вспомогательного алгоритма «Нагрев до  $t$ », которому и передается значение температуры  $t = 150^\circ\text{C}$ . После выполнения вспомогательного алгоритма, т. е. нагрева жидкости до  $150^\circ\text{C}$ , исполнитель переходит к следующему действию 5. Алгоритм нагрева может еще неоднократно использоваться в этом же основном алгоритме или в любом другом алгоритме, обеспечивая каждый раз нагрев до нужной температуры  $t$ .

Вспомогательный алгоритм используют, например, для периодической уборки стружки на токарных станках, работающих в автоматическом режиме. В рассмотренном ранее алгоритме сортировки изделий измерение диаметра изделия тоже производится с помощью вспомогательного алгоритма. В кулинарной книге рецепт (алгоритм) приготовления, например слоеного теста, описывается только один раз, а в рецептах всех изделий из этого теста приводится ссылка на этот вспомогательный алгоритм.

Одни и те же вспомогательные алгоритмы могут использоваться в основных алгоритмах, предназначенных для решения совершенно разных задач. Поэтому в сложных автоматических системах, где количество выполняемых операций велико, обычно создаются библиотеки вспомогательных алгоритмов.

## **2.3. СПОСОБЫ ЗАПИСИ АЛГОРИТМОВ**

### **2.3.1. Словесная запись**

Существует несколько способов записи алгоритмов. Способ, который мы использовали до сих пор, — словесная запись.

Словесная запись алгоритма — это запись последовательности действий на одном из языков человеческого общения.

Этот способ удобен тем, что последовательность действий четко изложена на понятном нам языке. Он особенно подходит для линейных алгоритмов, и мы постоянно пользуемся им в повседневной жизни, рассказывая кому-нибудь, как сделать или отремонтировать что-то, как пройти или проехать куда-то и т. д.

### **2.3.2. Графическое представление**

Если по ходу алгоритма приходится в зависимости от выполнения какого-то условия выбирать те или иные варианты действий, то словесная запись становится громоздкой и в ней легко запутаться. Вспомните, как мы искали очередное действие после того, как вы взяли хлеб из хлебницы, а алгоритм все равно посылал вас за хлебом в магазин. В этом случае более наглядным и предпочтительным становится графическое представление алгоритма.

*Графическое представление* (блок-схема) алгоритма — это набор специальных графических символов, расположенных в порядке выполнения действий алгоритма.

Для этого способа записи алгоритмов используются стандартизованные графические обозначения (символы).

Начало алгоритма обозначается знаком



Идущая вниз линия означает переход к первому действию алгоритма. Таким же знаком обозначается и конец алгоритма, к которому линия от последнего символа подходит сверху:



Любое действие алгоритма изображается прямоугольником, в который обычно вписывают название действия:

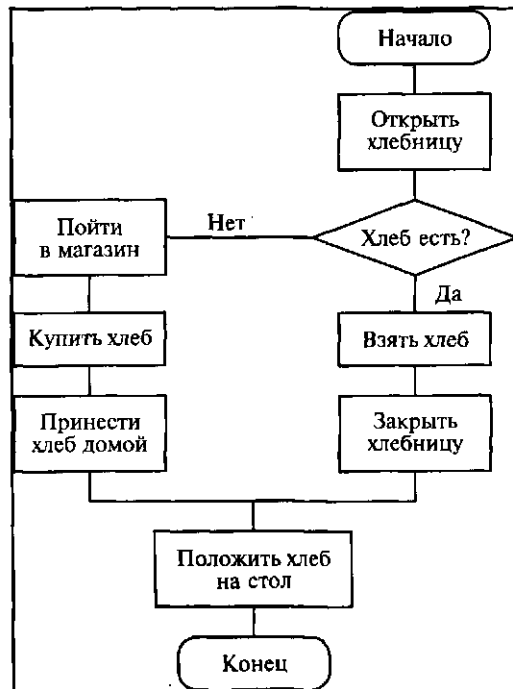
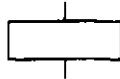


Рис. 2.1. Блок-схема алгоритма «Взять хлеб»

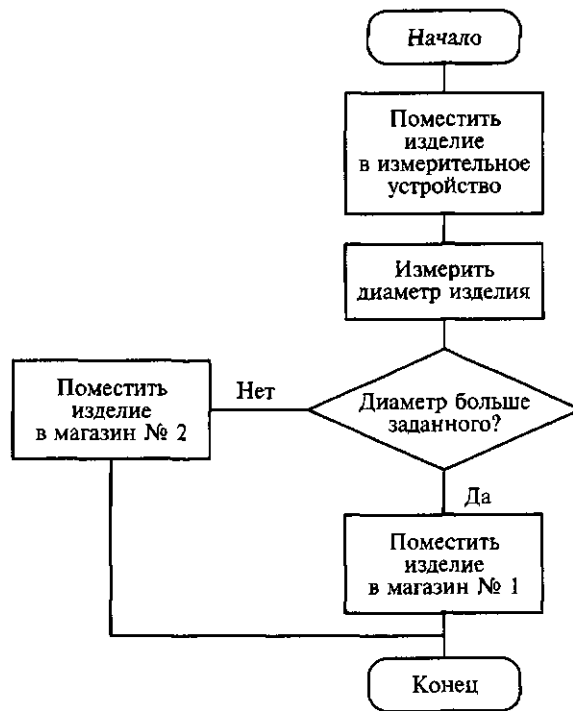
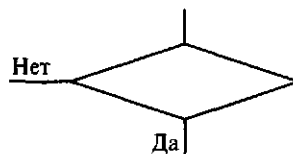


Рис. 2.2. Блок-схема алгоритма сортировки изделий

Если алгоритм содержит несколько действий, выполняемых последовательно одно за другим, то все они могут быть вписаны в один прямоугольник.

Проверка выполнения условия и выбор ветви алгоритма, соответствующей выполнению или невыполнению условия, представляются ромбом, в который условие вписывается в виде вопроса. При выполнении условия переход к нужной ветви происходит в направлении ответа «Да», а если условие не выполнено — в направлении ответа «Нет»:



Часто для исполнения алгоритма необходим ввод информации в виде чисел или в иной форме. Результатом исполнения алгоритма (или его части) может быть вывод информации в том или ином виде.

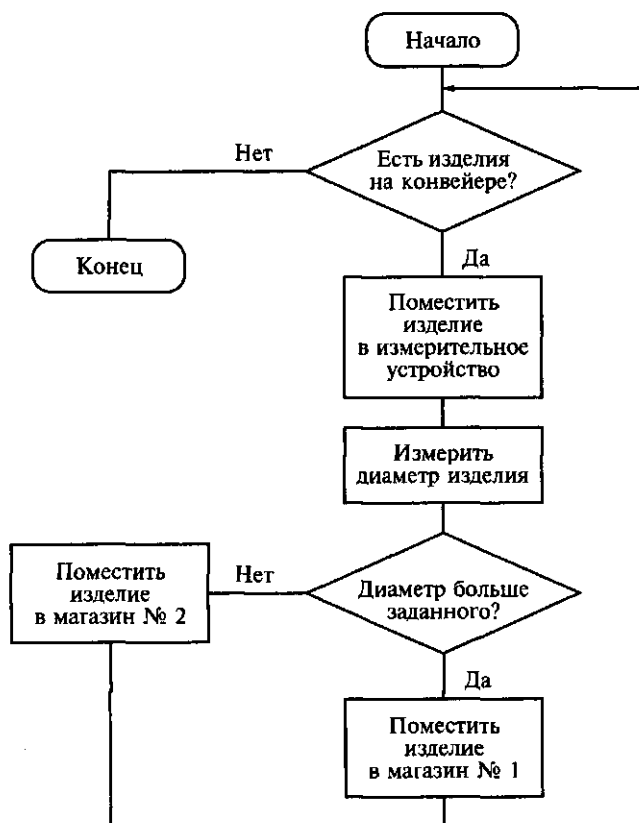
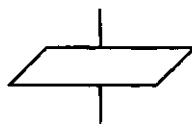
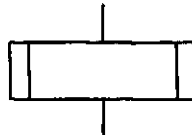


Рис. 2.3. Блок-схема циклического алгоритма сортировки изделий

Операция ввода данных или вывода результатов обозначается следующим образом:



Символ вызова вспомогательного алгоритма имеет вид



Есть и другие символы для обозначения различных операций в алгоритме.

Графические символы соединяются между собой прямыми линиями в соответствии с последовательностью действий, ведущих к достижению цели. Стандартное направление перехода от символа к символу — сверху вниз и слева направо. Если по каким-то причинам расположить символы в таком порядке не удастся и переход к очередному символу должен произойти в ином направлении, то это направление указывают стрелкой.

Составим блок-схемы некоторых из рассмотренных ранее алгоритмов. Блок-схемы двух алгоритмов с ветвлением — «Взять хлеб» и сортировки изделий — приведены на рис. 2.1, 2.2. Они наглядно показывают преимущество графического представления алгоритмов — легко прослеживается последовательность действий как при выполнении, так и при невыполнении проверяемого условия.

На рис. 2.3 представлена блок-схема циклического алгоритма, являющегося развитием алгоритма сортировки изделий. Предыдущий алгоритм представляет собой цикл, который повторяется при

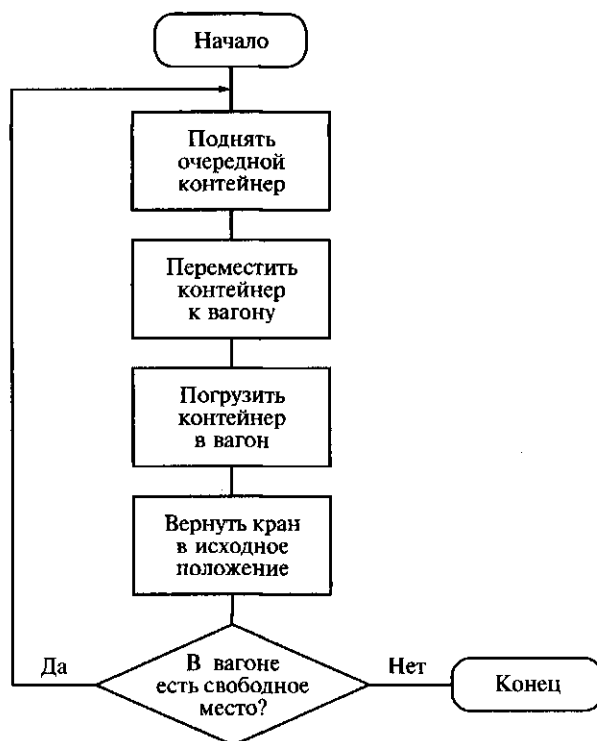


Рис. 2.4. Блок-схема алгоритма погрузки контейнеров



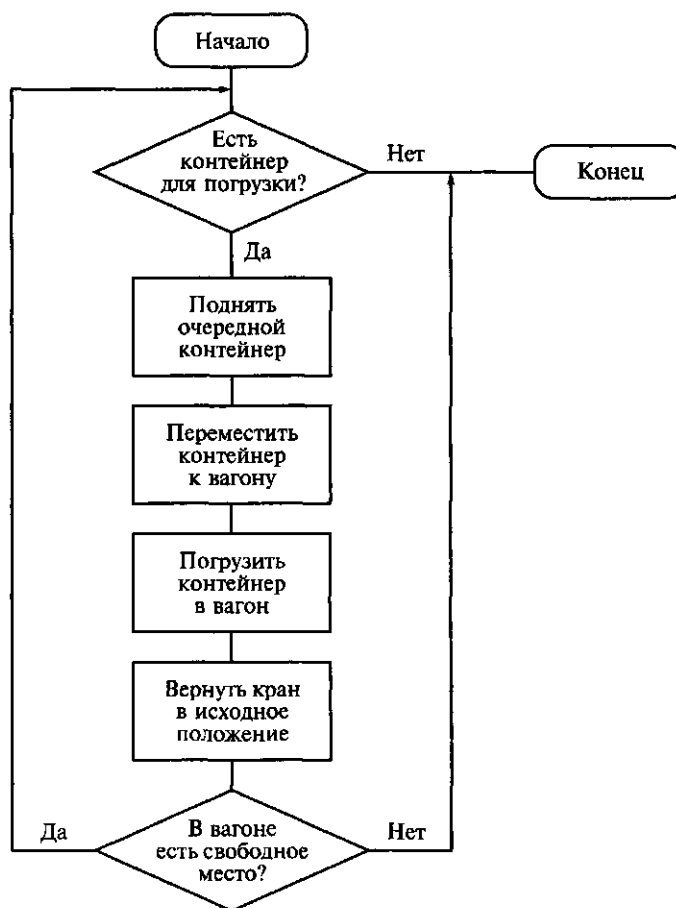


Рис. 2.5. Блок-схема алгоритма погрузки контейнеров с двумя условиями

положительном результате проверки условия наличия изделий на конвейере.

На блок-схеме хорошо видны границы цикла — он охвачен линией, которая поднимается вверх, противоположно стандартному направлению перехода от символа к символу, и заканчивается стрелкой. После выполнения цикла происходит *возврат* по этой линии к первому действию цикла, в данном случае к проверке наличия изделий на конвейере.

Линия возврата фактически заменяет строку *Конец* цикла, ограничивающую цикл снизу при словесном описании алгоритма, и она же указывает на условие *Есть изделия на конвейере?*, которое является

97937

верхней границей цикла. Если условие не выполнено, т. е. изделий на конвейере нет, то цикл не повторяется и выполнение алгоритма заканчивается.

В этом алгоритме проверка условия производится до начала цикла и возможна ситуация, когда цикл не исполнится ни разу: если изделий на конвейере нет, то проверка условия сразу выводит на окончание цикла.

Рассмотрим блок-схему циклического алгоритма погрузки контейнеров из подразд. 2.2.3, где проверка условия повторения цикла производится после его исполнения (рис. 2.4). Вслед за символом *Начало* следуют действия алгоритма, поэтому цикл исполняется всегда, как минимум, один раз. Если погрузка контейнера привела к отсутствию свободного места в вагоне, то проверка условия сразу выводит на символ *Конец*. Линия возврата по-прежнему охватывает цикл, указывая его нижнюю и верхнюю границы.

Блок-схема расширенного варианта этого алгоритма, содержащего условия, проверяемые как до, так и после выполнения команд цикла (см. подразд. 2.2.3), показана на рис. 2.5. Проследите по этому рисунку ход исполнения алгоритма при различных комбинациях

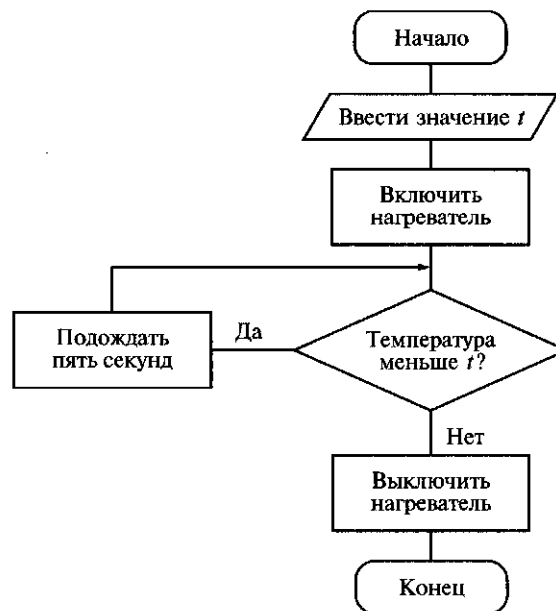


Рис. 2.6. Блок-схема алгоритма «Нагрев до  $t$ »

условий наличия свободного места в вагоне и наличия контейнеров для погрузки.

Рассмотрим блок-схемы вспомогательных алгоритмов. У алгоритма, используемого в качестве вспомогательного, есть одна особенность: в нем производятся действия с информацией, переданной ему из основного алгоритма, и туда же при необходимости сообщается результат выполнения вспомогательного алгоритма. Поэтому блок-схема вспомогательного алгоритма содержит символ ввода данных, а при необходимости — и символ вывода результатов, что подчеркивает взаимодействие вспомогательного алгоритма с основным.

На рис. 2.6 приведена блок-схема алгоритма «Нагрев до  $t$ ». Символ ввода данных указывает на получение из основного алгоритма значения температуры нагрева  $t$ . После выполнения алгоритма нагрева продолжается выполнение основного алгоритма с действия, следующего за командой вызова вспомогательного алгоритма. Сама команда вызова обозначается в блок-схеме основного алгоритма приведенным выше специальным символом, в который вписывается название вызываемого алгоритма.

### 2.3.3. Алгоритмический язык

Словесное и графическое представления алгоритмов позволяют наглядно проследить последовательность действий как в простых, так и в сложных алгоритмах. Однако наглядность имеет значение только для человека, но не для машины. Машина выполняет одно за другим действия, предписанные алгоритмом, который составил для нее человек.

Возможно, со временем машины научатся мыслить и смогут сами анализировать ситуации, создавать и выполнять алгоритмы, продвигаясь к ими же поставленным целям. У нас вызывает сегодня восхищение «умная» машина, обыгрывающая лучших гроссмейстеров в шахматы. По сути же она просто быстрее, точнее, в большем объеме и за меньшее время перебирает возможные варианты игры, которые заложил в нее человек. Так что единственный способ заставить машину совершить какое-то действие — дать ей команду, точно и однозначно соответствующую именно этому действию. Причем машина должна эту команду правильно и однозначно понять.

Последовательность действий должна четко выражаться последовательностью команд, а поскольку додумывать и догадываться машина не умеет, каждому шагу алгоритма (например, анализу

выполнения какого-то условия) должна соответствовать четко понимаемая машиной команда.

Поэтому если предполагается, что исполнителем алгоритма будет машина, то разработанный алгоритм надо представить в виде, учитывающем ограниченные возможности машины правильно понимать и выполнять команды. Для этого существует особый способ описания алгоритмов — запись на алгоритмическом языке.

*Алгоритмический язык* — это набор специальных служебных слов и правил для записи алгоритмов.

Служебные слова — это обычные слова нашего языка, но их запись в алгоритмическом языке однозначна и никакие другие варианты записи этих слов недопустимы. Например, если вы пишете адрес на конверте, вы можете написать: «город Пенза», или «гор. Пенза», или «г. Пенза». Если бы слово «город» входило в список служебных слов алгоритмического языка, то его всегда нужно было бы писать только в одном виде (например: «гор.»). Даже точка после сокращения слова должна быть особо оговорена — ставить ее или нет.

Перед названием каждого алгоритма, записанного на алгоритмическом языке, ставится служебное слово АЛГ (буквы заглавные, без точки). Для указания начала и конца алгоритма используются служебные слова НАЧ и КОН. Каждый шаг алгоритма записывается отдельной строкой.

Общий вид *линейного алгоритма* на алгоритмическом языке:

```
АЛГ «<название>»
НАЧ
    <действие 1>
    <действие 2>
    ...
КОН
```

Угловые скобки означают, что в данной строке должно быть записано то, что указано в этих скобках.

Для записи *алгоритмов с ветвлением* используются служебные слова ЕСЛИ, ТО, ИНАЧЕ, ВСЕ (конец ветвления). Общий вид ветвления:

```
ЕСЛИ <условие> ТО
    <действие 1>
ИНАЧЕ
    <действие 2>
ВСЕ
```

Запишем на алгоритмическом языке алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 2.2.

```
АЛГ «Алгоритм сортировки изделий»  
НАЧ  
    поместить изделие в измерительное устройство  
    измерить диаметр изделия  
ЕСЛИ диаметр больше заданного ТО  
    поместить изделие в магазин № 1  
ИНАЧЕ  
    поместить изделие в магазин № 2  
ВСЕ  
КОН
```

Бывает так, что после строки ИНАЧЕ в алгоритме с ветвлением располагается не действие, а новое условие. Тогда это второе условие вводится не в отдельной строке ЕСЛИ, а в той же строке, в которой находится ИНАЧЕ:

```
ИНАЧЕ ЕСЛИ <условие 2> ТО  
    <действие 2>  
ИНАЧЕ  
    <действие 3>
```

Последнее ИНАЧЕ относится к условию 2, т. е. соответствует невыполнению этого условия. Сочетание служебных слов ИНАЧЕ ЕСЛИ часто заменяют служебным словом ИИЕС.

В *циклических* алгоритмах используются служебные слова ПОКА, ЦИКЛ, КЦИКЛ (конец цикла). Общий вид циклического участка алгоритма:

а) с предусловием —

```
ПОКА <условие>  
    <действие>  
ЦИКЛ
```

б) с постусловием —

```
ЦИКЛ  
    <действие>  
ПОКА <условие>
```

Запишем циклический алгоритм сортировки изделий, блок-схема которого приведена на рис. 2.3. Судя по блок-схеме, это алгоритм с предусловием. Поэтому верхней границей цикла является условие *Есть изделия на конвейере?* Далее следуют действия цикла, а рас-

положение нижней границы КЦИКЛ показывает линия возврата. Имеющееся в алгоритме ветвление входит в цикл и заканчивается перед концом цикла. Для удобства чтения алгоритма действия, образующие цикл, сдвигаются при записи вправо — так цикл легче увидеть. Аналогично можно сдвинуть участок с ветвлением. Алгоритм записывается в порядке продвижения по блок-схеме и выглядит следующим образом:

```
АЛГ «Циклический алгоритм сортировки изделий»
НАЧ
  ПОКА есть изделия на конвейере
    поместить изделие в измерительное устройство
    измерить диаметр изделия
    ЕСЛИ диаметр больше заданного ТО
      поместить изделие в магазин № 1
    ИНАЧЕ
      поместить изделие в магазин № 2
  ВСЕ
КЦИКЛ
КОН
```

Рассмотрим последовательность действий в этом алгоритме. Пока предусловие *Есть изделия на конвейере* не нарушено, выполняется измерение диаметра изделия и оно помещается в магазин № 1 или № 2. Служебное слово ВСЕ означает конец ветвления, после которого следует переходить к следующей строке алгоритма. В ней помещено слово КЦИКЛ (конец цикла), требующее возврата к началу цикла, т. е. к строке ПОКА, после чего цикл повторится. Когда условие в строке ПОКА нарушится, по правилам выполнения циклических алгоритмов надо будет перейти к строке, следующей за указателем конца цикла КЦИКЛ (в нашем случае — это строка КОН), и выполнение алгоритма заканчивается.

Запишем на алгоритмическом языке более сложный алгоритм (см. рис. 2.5).

В этом алгоритме, как видно из блок-схемы, есть и предусловие (*Есть контейнер для погрузки?*), и постусловие (*В вагоне есть свободное место?*), поэтому в нем сочетаются записи в виде ПОКА... КЦИКЛ и в виде ЦИКЛ...ПОКА.

Первый элемент блок-схемы при продвижении от начала алгоритма — линия возврата, идущая от символа постусловия. В алгоритмах с постусловием она указывает место, с которого возобновляется цикл при его повторении. В алгоритмическом языке это место обозначается служебным словом ЦИКЛ.

Далее расположен графический элемент предусловия, вводимого словом ПОКА, после которого идет последовательность действий вплоть до постусловия. Постусловие тоже вводится служебным словом ПОКА. Если условие выполнено, то в алгоритмах с постусловием следует возврат к строке ЦИКЛ, а если не выполнено — переход к следующей за постусловием строке (в нашем случае — к окончанию алгоритма КОН).

Все это происходит, если не нарушено предусловие *Есть контейнер для погрузки*. Когда же это условие нарушено, в алгоритмах с предусловием происходит переход к строке, следующей за указателем конца цикла КЦИКЛ (в нашем случае — к окончанию алгоритма КОН).

В итоге этот алгоритм на алгоритмическом языке записывается следующим образом:

```
АЛГ «Алгоритм погрузки контейнеров»
НАЧ
  ЦИКЛ
    ПОКА есть контейнер для погрузки
      поднять очередной контейнер
      переместить контейнер к вагону
      погрузить контейнер в вагон
      вернуть кран в исходное положение
    ПОКА в вагоне есть свободное место
  КОН
  КЦИКЛ
КОН
```

Сдвиг строк при записи позволяет легко сориентироваться, где начинается и заканчивается цикл ПОКА...КЦИКЛ, а где ЦИКЛ...ПОКА.

Рассмотрим запись на алгоритмическом языке вспомогательных алгоритмов. Так как вспомогательным может быть любой алгоритм, никаких специфических особенностей в такой записи нет. Ввод данных из основного алгоритма, так же как и вывод результатов (при необходимости), является во вспомогательных алгоритмах обычным действием.

Так как в основном алгоритме вызов вспомогательного алгоритма производится простым указанием его заголовка, то общий вид основного алгоритма на алгоритмическом языке может быть, например, следующим:

```
АЛГ «<название>»
НАЧ
```

<действие 1>  
<действие 2>  
<название вспомогательного алгоритма 1>  
<действие 3>  
<название вспомогательного алгоритма 2>  
<действие 4>

КОН

Как уже указывалось ранее, запись алгоритмов на алгоритмическом языке является подготовительным этапом на пути к представлению последовательности команд в такой форме, в какой она могла бы быть воспринята, понята и выполнена машиной.

Наиболее распространенными машинами, используемыми для этих целей, являются ЭВМ. Алгоритмические языки, ориентированные на их восприятие электронно-вычислительными машинами и учитывающие особенности работы ЭВМ, называются *языками программирования*.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Сформулируйте определение алгоритма.
2. В чем особенность восприятия алгоритмов машинами?
3. Дайте определение программы.
4. Назовите виды алгоритмов.
5. Что такое линейный алгоритм? Приведите пример.
6. Что такое условный алгоритм? Приведите пример.
7. Что такое циклический алгоритм? Приведите пример.
8. Что такое вспомогательный алгоритм? Приведите пример.
9. Расскажите о способах записи алгоритмов.
10. Изобразите и поясните графические символы, применяемые для записи алгоритмов.
11. Что такое блок-схема алгоритма?
12. Сформулируйте определение алгоритмического языка.



# АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ, УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

Ранее были рассмотрены алгоритмы, описывающие действия разных исполнителей в самых различных ситуациях — как в бытовых, так и в производственных. Однако любой из этих алгоритмов воспринимался нами как последовательность команд и указаний, отданных человеком, а некая абстрактная машина, которая указывалась как исполнитель алгоритма, представлялась, скорее, в виде человекообразного робота, слышавшего, понимавшего и выполнявшего эти команды своими руками.

Конечно, реальные команды алгоритмов не звучат громкими голосами и для их восприятия машинам не нужны уши. Технические устройства, выполняющие алгоритмы, используют другие способы передачи и приема информации и действуют не руками. Они объединяются в системы, способные путем выполнения множества алгоритмов решать важнейшие задачи автоматизации производства — контроля, управления и регулирования.

### 3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

#### 3.1.1. Процессы

Как уже указывалось в гл. 1, из всего многообразия производственной жизни мы будем рассматривать только то, что непосредственно связано с созданием, накоплением, преобразованием и транспортированием материалов, изделий и энергии.

Каждая из перечисленных задач требует совершения определенных операций в определенной последовательности — только в этом случае задача будет выполнена, т. е. будет достигнута поставленная цель. При этом под *операцией* будем понимать действие, совершаемое определенным образом над определенным объектом на определенном оборудовании. Понятие операции может быть более широким

или более узким — это зависит от сложившейся в разных отраслях практики и от того, насколько детально описываются этапы решения задачи. Мы делаем акцент на сущность операции — она является структурной единицей процесса.

*Технологический процесс* — последовательность операций, ведущих к достижению цели.

Изготовление бутерброда, сортировка изделий, погрузка контейнеров, заполнение резервуаров, нагрев вещества до заданной температуры — все это технологические процессы.

Есть на предприятиях еще одна группа процессов, которые непосредственно не связаны с производством, но с точки зрения автоматизации их можно рассматривать так же, как технологические процессы. Например, нагрев детали до заданной температуры — технологический процесс, но точно так же можно обеспечить поддержание нормальной температуры в производственных помещениях. Контроль состояния дискретных исполнительных механизмов (открыт — закрыт) — элемент технологического процесса, но по этому же принципу организована система охраны помещений (и не только на производстве, но и в жилых домах).

Эти примеры показывают, что при творческом подходе можно применить знания, полученные при изучении автоматизации производства, во многих других областях нашей жизни, в том числе не имеющих к производству никакого отношения.

### 3.1.2. Управление

Последовательность действий, которые следует предпринять для достижения какой-либо цели, нужно сначала разработать (придумать), затем записать и выполнить. Результатом разработки последовательности действий является план действий в голове разработчика, результатом записи — алгоритм, а результатом выполнения — последовательность операций (технологический процесс).

Если технологический процесс выполняет человек, то ему понятно, как обеспечить выполнение последовательности действий, предусмотренной алгоритмом. Например, вряд ли у вас вызовет вопросы процесс изготовления бутерброда, описанный ранее.

Для выполнения каких-либо действий машиной нужно обеспечить понимание ею алгоритма как последовательности команд, ведущих к достижению цели. Человеку достаточно увидеть запись алгоритма в словесной или графической форме, чтобы реализовать технологический процесс. Машина увидеть запись алгоритма не может. Даже

если он записан на алгоритмическом языке, прочитать его команды машине не по силам.

Следовательно, при машинном исполнении алгоритма между ним и технологическим процессом должен быть посредник, который обеспечит понимание машиной команд алгоритма. Нужен некий переводчик, умеющий переводить команды в такие воздействия на машину, которые заставят ее выполнять нужные действия в соответствии с алгоритмом. Функция, которую предстоит выполнять этому переводчику, называется управлением.

*Управление* — это формирование воздействий на объект в соответствии с заданным алгоритмом.

Объект, на который производится воздействие, называется *объектом управления*. Им может быть не только машина, но и человек, предприятие, общество, а также процесс, например технологический.

Формировать управляющее воздействие тоже может как человек, так и машина.

Человека, выполняющего функции управления, называют по-разному: управляющий, директор, руководитель, а также водитель, пилот, машинист и т. д. Человека, управляющего автоматизированной системой, принято называть *оператором*. В автоматических системах управляющие воздействия формирует управляющее устройство.

Водитель управляет автомобилем в соответствии с планом поездки для достижения поставленной цели — попадания на нужную улицу или в нужный город. Он воздействует на автомобиль через руль, педаль тормоза, рычаг переключения передач. Водитель в этом случае — управляющий, а автомобиль — объект управления. Пилот, ведущий самолет, — тоже управляющий, во всяком случае до тех пор, пока он не передаст управление автопилоту. Тогда автопилот станет управляющим устройством, объектом управления которого будет самолет. Машина будет управлять машиной, т. е. самолет станет полностью автоматической системой.

Любая машина, используемая в качестве объекта управления, обычно способна выполнять одно за другим разные действия, а также выполнять одно и то же действие многократно. Последовательность действий (операций) — это уже процесс. Поэтому между управлением машинами и управлением процессом существенной разницы нет.

Управление технологическим процессом — это управление последовательностью операций, т. е. формирование управляющих воздействий на тех, кто эти операции выполняет. В цехе, где работы выполняются вручную, управление технологическим процессом

сводится к управлению руководителем действиями рабочих. Если же действия совершают машины, то управление процессом представляет собой формирование воздействий на машины, с тем чтобы они выполняли нужные действия в нужной последовательности в соответствии с алгоритмом. В этом случае воздействовать на машины может как оператор, так и управляющее устройство.

### 3.1.3. Сигналы

Как уже было сказано ранее, управление — это формирование воздействий на объект управления. Что представляют собой эти воздействия? Ответ зависит от того, кто или что является объектом управления.

Если объект управления — человек, то воздействие на него в соответствии с алгоритмом представляет собой отданное ему устно или письменно распоряжение о выполнении той или иной последовательности действий, т. е. воздействие является информационным. Если же объект управления — машина, то воздействие должно быть таким, чтобы оно вызвало у машины ответную реакцию в виде совершаемого ею нужного действия.

Под машиной подразумевается устройство, выполняющее за человека ту или иную работу. Но человеку свойственны два вида работы: умственная и физическая. Умственная работа связана с переработкой информации, физическая — с энергетическим воздействием на объекты материального мира. Соответственно различаются машины, перерабатывающие информацию, которые называются *информационными устройствами*, и машины, обеспечивающие энергетическое воздействие на объекты, которые называются *исполнительными механизмами*.

Технологические процессы связаны с созданием и преобразованием объектов материального мира. Для выполнения операций технологического процесса исполнительные механизмы затрачивают энергию, поэтому управляющее воздействие, которое заставляет их работать, тоже должно быть энергетическим.

Существует множество вариантов такого воздействия: электрическое, механическое, гидравлическое и др. Эти воздействия характеризуются различными физическими величинами: электрическим напряжением, перемещением, давлением и т. д. Например, управляющее воздействие может представлять собой поданный на исполнительный механизм электрический ток или напряжение, созданное в трубопроводе давление, перемещение заслонки и т. д.

Напряжение, давление, перемещение могут быть и большими, и маленькими, действовать в течение разных интервалов времени и иметь разные направления, т.е. эти физические величины могут изменяться. Изменения могут быть связаны с состоянием устройств, формирующих эти величины, а значит, они могут содержать информацию об этих устройствах.

Информация, которая может быть использована в каких-либо полезных целях, называется *полезной информацией*, а физическая величина, содержащая эту информацию, называется *сигналом*.

Сигнал — это изменяющаяся физическая величина, значения которой содержат полезную информацию.

Изменяющиеся физические величины, не несущие полезной информации, в теории информации относятся к шумам.

Следует отличать сигнал от его носителя.

*Носителями сигналов* являются материальные объекты, обладающие энергией: электрический ток, поток жидкости, свет (электромагнитное поле) и т.д.

Сигналы могут быть электрические, гидравлические, световые и др. Практически во всех автоматических системах используют электрические сигналы.

Сигнал является одной из характеристик его носителя: *сила тока, давление жидкости, интенсивность света*, а в некоторых случаях — *время существования носителя сигнала*.

Таким образом, управляющие воздействия представляют собой сигналы, формируемые оператором или управляющим устройством и передаваемые исполнительным механизмам, которые называются *сигналами управления, или управляющими сигналами*.

В зависимости от того, какое действие должен выполнить исполнительный механизм, возможны два вида управляющих сигналов: аналоговые и дискретные.

*Аналоговые сигналы* используют в случаях, когда выполняемое действие имеет характеристику, которая может принимать бесчисленное множество значений: «повернуть заслонку на 41°», или «...на 44°», или «...на 52,5°»; «переместить движок реостата на 27 мм», или «...на 11 мм», или «...на 2,7 мм»; «увеличить частоту вращения двигателя до 600 об/мин» или «...до 615 об/мин»; «нагреть деталь до 225 °С» или «...до 530 °С» и т.д. В этом случае управляющее воздействие должно быть изменяемым, чтобы обеспечить именно такую реакцию исполнительного механизма, которая требуется для правильного выполнения данной операции и всего алгоритма, т.е. управляющий сигнал должен содержать информацию о количественной характеристике действия.

Например, исполнительный механизм должен переместить заготовку в зависимости от заданных условий или на 3 мм, или на 5,1 мм, или на 8,2 мм. Изменяя значение управляющего сигнала, например электрического напряжения, мы должны иметь возможность обеспечить нужное перемещение. Другой пример: для нагрева детали до заданной температуры мы должны, подавая соответствующий сигнал, оказать на нагревательное устройство воздействие, приводящее именно к этой температуре. И расстояние, и температура могут быть любыми (конечно, в определенных пределах), значит, задающие их управляющие сигналы тоже могут иметь любые значения.

Большинство физических величин могут принимать любые значения. Если они изменяются, то их значения могут становиться чуть-чуть больше или чуть-чуть меньше, причем количество чуть-чуть отличающихся различных значений бесконечно. Такие величины называются аналоговыми. Они непрерывны, т.е. их значения не могут изменяться скачками.

*Аналоговыми* называются величины, которые могут иметь бесчисленное множество значений.

Следовательно, управляющие сигналы, которые могут иметь любые значения, т.е. бесчисленное множество значений, тоже являются аналоговыми. Понятие «любые значения» здесь не совсем точное, так как сигналы вырабатываются конкретными устройствами с определенными характеристиками, ограниченными, например, напряжением питания. Поэтому значения сигналов могут быть любыми только в определенных пределах.

Сигналы, которые могут принимать любые значения (в определенных пределах), называются *аналоговыми*.

Каждый исполнительный механизм под действием аналогового управляющего сигнала выполняет предписанное действие настолько, насколько это определено значением сигнала.

**Дискретные сигналы** используют в случаях, когда выполняемое действие не имеет количественной характеристики, т.е. оно может быть выполнено только однозначно — его невозможно выполнить ни чуть-чуть больше, ни чуть-чуть меньше (например: «закрыть клапан», «переместить рычаг до упора», «включить двигатель», «установить инструмент А в позицию № 7» и т.д.). У клапана могут быть только два состояния: он или открыт, или закрыт (его нельзя закрыть чуть-чуть больше). Точно так же нельзя чуть-чуть больше включить двигатель — он или включен, или выключен. И хотя инструмент А может иметь много позиций, каждая из них однозначна — нельзя установить его в позицию № 7 чуть-чуть больше или чуть-чуть меньше.

В этих примерах управляющий сигнал может быть самым простым, например в виде подаваемого на исполнительный механизм электрического напряжения. Нет напряжения — нет действия, подано напряжение — выполняется действие. Возможно, в каких-то случаях это напряжение придется подать несколько раз (например, семь импульсов напряжения, чтобы установить инструмент в позицию № 7). Но значение подаваемого напряжения стандартное, фиксированное, оно определяется только паспортными данными исполнительного механизма, а не производимым им действием. Для управления важно не значение напряжения, а то, есть оно или нет, т. е. такой управляющий сигнал может иметь только одно из двух фиксированных значений: или ноль, или некоторое значение, определяемое характеристиками объекта управления.

Существуют величины, которые характеризуются множеством фиксированных значений, например количество каких-либо объектов, которое всегда выражается целыми числами.

Величины, которые имеют два фиксированных значения или более, называются *дискретными*.

Дискретные величины по своей природе прерывистые, так как между любыми двумя соседними значениями этих величин имеется разрыв, называемый *шагом дискретизации*.

Сигналы, имеющие два фиксированных значения или более, также называются *дискретными*.

В системах контроля и управления обычно используются двоичные дискретные сигналы, имеющие только два фиксированных значения, как рассмотренные ранее управляющие сигналы.

Можно создать условия, при которых аналоговые величины проявляют себя как дискретные. Например, масса — аналоговая величина. Но если вы купили несколько пакетов молока по 1 кг каждый, то масса вашей покупки становится дискретной — сколько бы ни было у вас пакетов, их общая масса может иметь только фиксированные значения: 2, 3, 4 кг и т. д. Такое преобразование аналоговой величины в дискретную называется *дискретизацией*.

Таким образом, любая физическая величина по характеру изменения ее значения может быть или *постоянной* (если она имеет только одно фиксированное значение), или *дискретной* (если она может иметь два или более фиксированных значений), или *аналоговой* (если она может иметь бесчисленное множество значений).

В автоматических системах постоянные по значению физические величины часто используются в качестве эталонных для сравнения с ними других величин, изменяющихся в ходе различных процессов.

Мы рассмотрели различные виды управляющих сигналов. Однако сигналы могут содержать не только информацию, необходимую для управления, но и любую другую информацию, которую нужно передать различным техническим устройствам или оператору. Например, сигналы, формируемые различными датчиками, несут информацию о значениях технологических параметров, состоянии исполнительных механизмов и т. д.

### 3.1.4. Исполнительные механизмы

*Исполнительный механизм (ИМ)* — это устройство, воздействующее на объекты в соответствии с полученным управляющим сигналом.

Рассмотрим на примерах, как исполнительные механизмы воспринимают управляющие сигналы и выполняют предписанные ими действия.

В подразд. 2.2.3 был рассмотрен алгоритм сортировки изделий. Не учитывая организацию повторения цикла и измерения диаметра изделия, рассмотрим выполнение команд *Поместить изделие в магазин № 1* и *Поместить изделие в магазин № 2*. Очевидно, что исполнительный механизм, выполняющий эти действия, должен иметь некий рычаг, сдвигающий изделие с конвейера либо в сторону первого магазина, либо в сторону второго магазина. В такой ситуации на ИМ может подаваться сигнал, например в виде электрического тока, протекающего либо в одном, либо в другом направлении. Электрический ток обладает энергией, за счет которой может производиться перемещение рычага. Информация о номере магазина выражается направлением тока, в зависимости от которого рычаг смещается в ту или другую сторону.

В подразд. 2.2.3 также был рассмотрен алгоритм погрузки контейнеров. Легко представить кран, который поднимает контейнер, переносит его к вагону и погружает в вагон. Вопрос заключается в том, какие сигналы надо подавать крану для выполнения этих действий.

Пусть подъем и перемещение груза осуществляются с помощью электродвигателей, которые являются исполнительными механизмами. Тогда сигнал может представлять собой электрическое напряжение, которое подается на двигатель в течение какого-то времени.

Очевидно, что чем больше это время, тем на большую высоту кран поднимет груз и на большее расстояние его переместит. Следовательно, информация в этом сигнале представлена его длительностью, т. е. временем подачи напряжения на электродвигатель.



Для выполнения команды *Поднять очередной контейнер* напряжение подается на двигатель подъема груза в течение времени, необходимого для подъема груза на достаточную высоту. Для выполнения следующей команды *Переместить контейнер к вагону* напряжение подается на двигатель, перемещающий кран с грузом, в течение времени, необходимого для перемещения груза от контейнерной площадки до вагона. Для выполнения команды *Погрузить контейнер в вагон* напряжение подается на двигатель, опускающий груз, в течение времени, необходимого для опускания груза до пола вагона.

Конечно, выполнение алгоритмов представлено здесь упрощенно, но оно позволяет понять, какими могут быть сигналы и как на них реагируют ИМ.

Наиболее часто в автоматических системах используются электрические ИМ. Однако существуют механизмы, использующие в качестве источника энергии сжатый воздух, — *пневмоприводы*. В *гидроприводах* используется энергия жидкости под давлением. Чаще эти механизмы являются комбинированными и используют еще и электрическую энергию.

### 3.1.5. Датчики

В подразд. 2.2.2 был рассмотрен алгоритм изготовления бутерброда. Это алгоритм с ветвлением, и выполняемые действия зависят от того, есть ли хлеб в хлебнице. Как это проверить?

Если исполнителем алгоритма являетесь вы, то вам достаточно заглянуть в хлебницу. Информацию о том, есть ли там хлеб, вы получите с помощью органов зрения — глаз.

У машины глаз нет, поэтому машине — исполнителю алгоритма — требуется какое-то устройство, которое сообщало бы ей нужную информацию. В данном случае это должна быть информация типа «есть — нет». Аналогичное устройство необходимо для выполнения алгоритма сортировки изделий, рассмотренного в подразд. 2.2.3 (там нужно было определить наличие изделий на конвейере). Каким может быть такое устройство и как оно может определить наличие или отсутствие хлеба в хлебнице или детали на конвейере, будет рассмотрено далее.

В подразд. 2.2.4 был рассмотрен алгоритм нагрева детали до нужной температуры. В этом алгоритме есть условие *Если температура меньше t, то...* Как узнать температуру детали? Для этого нужно какое-то устройство, получающее информацию о температуре и передающее ее дальше для использования при выполнении алгоритма. Причем это уже не простейшая информация типа «есть—нет»,

а информация о текущем значении температуры, изменяющейся в широком диапазоне.

По этим примерам можно сделать вывод, что для выполнения алгоритмов кроме исполнительных механизмов нужны устройства, умеющие получать информацию об объектах окружающего мира, в том числе воспринимать физические величины, характеризующие свойства и состояние этих объектов (перемещение, температуру, влажность, давление, электрическое напряжение и т. д.). Полученную информацию они должны передавать тому, кто будет использовать ее для принятия решения о дальнейших действиях, — оператору или управляющему устройству.

Поскольку в автоматических системах практически всегда используются электрические сигналы, именно их мы и будем рассматривать далее как носителей полезной информации. Таким образом, рассматриваемые устройства должны формировать электрические сигналы, которые содержат информацию о свойствах и состоянии объектов окружающего мира. Устройства, выполняющие эту функцию, называются *датчиками*.

*Датчики* — это устройства, которые преобразуют физические величины, характеризующие свойства и состояние объектов, в сигналы.

Если речь идет об автоматизации технологического процесса, то датчики получают информацию о свойствах и состоянии обрабатываемых материалов, оборудования, реализующего технологический процесс, выпускаемых изделий и т. д. Эти свойства и состояния могут характеризоваться различными физическими величинами, которые называются параметрами технологического процесса, или технологическими параметрами.

*Параметрами* называются физические величины, которые характеризуют свойства и состояние объектов.

Существуют датчики перемещения, скорости, температуры, давления, влажности и др. (см. гл. 4). В автоматических устройствах их называют датчиками технологических параметров. Так как параметры могут быть как аналоговыми, так и дискретными, датчики тоже подразделяются на аналоговые (датчики перемещения, температуры и т. д.) и дискретные (датчики состояния (например, «включено—выключено»), количества и т. д.).

### 3.1.6. Каналы связи

Оператор или управляющее устройство с помощью сигналов передает исполнительным механизмам информацию о требуемых

действиях, а датчики с помощью сигналов сообщают о состоянии связанных с ними объектов. Как происходит передача сигналов?

При использовании электрических сигналов под каналом связи понимают, как правило, обычную двухпроводную электрическую линию, которая конструктивно может как состоять из отдельной пары проводов, так и являться частью многопроводного кабеля.

В последнее время широко применяются также оптические кабельные линии связи с использованием лазеров и волоконной оптики. Они позволяют передавать одновременно огромное количество сигналов, но требуют установки специальной аппаратуры на обоих концах оптоволоконного кабеля. Эта аппаратура тоже является частью канала связи.

*Канал связи* — это совокупность технических устройств, обеспечивающих передачу сигналов.

В автоматизированных системах каналы связи играют важную роль, особенно если объекты управления занимают большую территорию и отдалены от оператора или управляющего устройства на значительное расстояние.

Именно в каналах связи сигналы подвергаются наибольшему искажению из-за воздействия естественных (а иногда и искусственно создаваемых) помех. Поэтому передача сигналов с высокой точностью и без искажений возможна лишь при правильном выборе каналов связи и их грамотном конструктивном исполнении. Например, недопустима прокладка электрических кабелей, по которым передаются слабые информационные сигналы от датчиков, рядом с кабелями, передающими мощные сигналы управления к исполнительным механизмам.

По мере прохождения сигналов по линии связи их мощность уменьшается, так как в кабелях происходит затухание сигналов из-за потерь энергии. Затухание сигналов — одна из важных характеристик линий связи. Другой важной характеристикой линий связи является пропускная способность. Она показывает максимальное количество информации, которое можно передать без ошибок по линии связи за единицу времени.

Для снижения стоимости каналов связи при их большой протяженности в качестве линий связи стремятся использовать линии, предназначенные для других целей. Широко используются телефонные линии (например, для выхода в Интернет) и даже линии электропередачи. Такие линии наряду со своей основной функцией — передачей электроэнергии переменного тока промышленной частоты 50 Гц — передают информационные сигналы на частотах от 30 до 500 кГц.

В зависимости от возможного направления передачи сигналов каналы связи подразделяются на *симплексные* (сигналы передаются в одном направлении), *дуплексные* (сигналы могут одновременно передаваться в обоих направлениях) и *полудуплексные* (с переключением направления).

### 3.1.7. Типы автоматических систем

Автоматические системы подразделяются на три основных типа:

- системы автоматического контроля;
- системы автоматического управления;
- системы автоматического регулирования.

*Система автоматического контроля (САК)* осуществляет автоматический сбор, обработку, анализ и представление оператору в удобном для него виде информации о параметрах технологического процесса.

Особенность этой системы заключается в том, что она не производит никакого воздействия на технологический процесс. Ее задача — дать оператору объективную картину о протекании процесса и привлечь его внимание в случае выхода технологических параметров за допустимые пределы.

Наряду с контролем параметров самого процесса система контроля часто производит диагностический контроль параметров технологического оборудования.

Результаты контроля параметров технологического процесса и оборудования обычно поступают в ЭВМ для регистрации, а при выходе параметров за заданные пределы — выводятся на экран ЭВМ, а нередко — на специальные световые табло и в виде звуковых сигналов.

Например, при реализации алгоритма наполнения резервуаров (см. подразд. 2.2.3) система автоматического контроля может определять и сообщать оператору уровень жидкости в резервуаре, ее температуру, расход жидкости (если она отводится из резервуаров для каких-то целей) и другие параметры, причем для каждого резервуара в отдельности.

Одновременно система контроля может следить за исправностью оборудования, например за наличием жидкости в трубопроводе, через который происходит наполнение резервуаров, ее давлением и температурой.

Если давление в трубопроводе или уровень жидкости в резервуаре превысит предельно допустимое значение, то возможна авария, поэтому система контроля предупреждает оператора о приближении параметра к опасному пределу.

*Система автоматического управления (САУ)* на основе информации о параметрах технологического процесса осуществляет автоматическое воздействие на технологическое оборудование с целью поддержания заданного хода и режимов технологического процесса.

Эта система обеспечивает протекание технологического процесса так, как это необходимо для достижения поставленной цели. Именно цель технологического процесса определяет алгоритм работы САУ. Если в какой-то момент выясняется, что для достижения цели алгоритм по каким-то причинам надо изменить, это изменение должно быть реализовано системой управления. Следовательно, система должна быть достаточно гибкой и следить за тем, не появились ли какие-то причины для изменения алгоритма. Рассмотрим это на примере тех же резервуаров, за состоянием которых следит система контроля.

Основной алгоритм заполнения резервуаров был приведен в подразд. 2.2.3. Что будет происходить после заполнения всех резервуаров? Уровень жидкости и другие параметры во всех резервуарах будут соответствовать заданным значениям, т.е. цель, поставленная в алгоритме, будет достигнута. Но если жидкость отводится из резервуаров, ее уровень будет изменяться. За этим следит система контроля.

Предположим, что система контроля сообщила оператору о падении уровня жидкости в резервуаре № 3. Это означает, что от датчика уровня жидкости резервуара № 3 поступил сигнал с информацией о пониженном уровне жидкости. Какие действия должны быть предприняты? Если целью является полное заполнение резервуаров, то нужно подвести шланг к резервуару № 3, открыть вентиль, подождать появления сигнала о заполнении резервуара, после чего закрыть вентиль. Такие действия есть в алгоритме, и они должны быть выполнены применительно к резервуару № 3.

Таким образом, система автоматического управления должна отреагировать на сигнал, поступивший из системы автоматического контроля, и выполнить ту часть алгоритма, которая в сложившейся ситуации приведет к достижению цели. Без системы контроля система управления работать не может, т.е. она может в начальной стадии выполнить алгоритм целиком и достичь цели, но для постоянного поддержания требуемых параметров технологического процесса она всегда должна быть в контакте с АСК.

*Система автоматического регулирования (САР)* осуществляет автоматическое поддержание заданного значения контролируемого параметра технологического процесса или его изменение по заданному закону.

Эту систему можно рассматривать как совокупность микросистемы контроля и микросистемы управления, работающих только с одним параметром. Часто такое совмещение может быть достаточно просто реализовано технически, что и привело к широкому распространению САР.

Пример системы автоматического регулирования температуры — электрический утюг. Повернув ручку установки температуры в положение, соответствующее типу ткани, вы задаете температуру, которую система регулирования автоматически поддерживает в течение всего времени глажения. Аналогичная система может использоваться для поддержания заданной температуры жидкости в резервуарах и трубопроводе, хотя практическая реализация ее в производственных условиях немного иная.

Пример системы автоматического регулирования уровня жидкости — устройство наполнения смывного бачка в туалете. Как только уровень воды в бачке понижается, открывается клапан и бачок заполняется водой; после достижения требуемого уровня клапан закрывается. Аналогичная система может использоваться и для регулирования уровня жидкости в резервуарах в производственных условиях.

Особенностью САР является ее полная автономность: как бы ни развивались события в технологическом процессе, контролируемый системой параметр будет всегда иметь заданное значение или изменяться по заданному закону (в последнем случае система будет более сложной).

Практически при автоматизации технологических процессов используются комбинированные автоматические системы, включающие в себя системы всех трех рассмотренных типов.

## **3.2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

### **3.2.1. Контролируемые параметры**

Как уже указывалось ранее, физические величины, характеризующие свойства и состояние материалов, изделий и оборудования технологических процессов, называются технологическими параме-

трами. К ним относятся линейные и угловые перемещения, скорость, в том числе угловая, ускорение, сила, давление, уровень, расход, влажность, температура, электрическое сопротивление, сила тока, магнитная индукция и др.

Для нормального протекания технологического процесса каждый параметр должен иметь определенное значение, которое называется *номинальным*. Обычно допускаются колебания значений параметров в некоторых пределах, тогда говорят о диапазоне номинальных значений параметра (регламентных границах). Например, для скоропортящихся продуктов питания диапазон номинальных температур их хранения составляет 2...4 °С, что соответствует условиям в бытовом холодильнике. Возможно задание только одной границы диапазона, например «температура не выше 20 °С» (подразумевается, что ниже этой границы допустима любая температура).

Выход параметра за пределы диапазона номинальных значений обычно не ведет к каким-либо негативным последствиям; просто нужно принять меры к скорейшей ликвидации отклонения. В этой ситуации система контроля предупреждает оператора о необходимости воздействия на технологический процесс для возврата отклонившегося параметра в регламентные границы.

Однако существуют такие максимальные или минимальные значения параметров, при достижении которых нарушается нормальный ход технологического процесса и ставится под угрозу возможность достижения поставленных целей, а возможно, даже возникает опасность аварии. Эти значения называются *предельными*. Превышение предельных значений недопустимо и расценивается как аварийная ситуация. При ее возникновении система контроля включает устройства световой и звуковой сигнализации, побуждающие оператора к оперативному вмешательству и выполнению специального алгоритма, направленного на предотвращение катастрофических последствий.

В качестве примера рассмотрим систему автоматического контроля параметров жидкости в резервуарах. Пусть высота резервуаров составляет 10 м, а уровень их заполнения от 8 до 9 м считается нормальным. Тогда технологический параметр «уровень жидкости» имеет диапазон номинальных значений от 8 до 9 м, а предельное значение — 10 м. Когда уровень жидкости опускается ниже 8 м или поднимается выше 9 м, датчик уровня жидкости формирует сигнал для системы контроля, которая и сообщает оператору о необходимости принятия мер по повышению или снижению уровня жидкости. Если же уровень жидкости достигнет 10 м, то система включит аварийную сигнализацию.

Так как уровень жидкости является аналоговой величиной, т. е. он может быть любым, то и значение контролируемого параметра «уровень жидкости» тоже может быть любым (в пределах высоты резервуара). Любыми могут быть также давление жидкости и ее температура. Параметры, которые могут иметь бесчисленное множество значений, как уже указывалось ранее, называются аналоговыми.

Однако среди контролируемых параметров могут быть и такие, которые имеют только два или несколько значений и называются, как уже указывалось ранее, дискретными. Например, параметр «состояние клапана» может иметь только два значения: «открыт» и «закрыт»; параметр «номер резервуара» может принимать только целые значения от 1 до 10, а параметр «переполнение резервуара» — только значения «да» или «нет». Эта информация поступает с соответствующих дискретных датчиков.

Таким образом, система автоматического контроля обеспечивает:

- сбор информации о значениях контролируемых аналоговых и дискретных параметров технологического процесса;
- анализ этой информации с точки зрения выхода параметров за пределы диапазона номинальных значений и превышения предельных значений параметров;
- представление информации о значениях параметров оператору на экране ЭВМ или специальных табло в удобной для него форме (в виде таблиц, графиков, диаграмм и мнемосхем).

### **3.2.2. Алгоритм системы автоматического контроля**

Перечисленные ранее функции должны выполняться техническими устройствами системы контроля автоматически, без вмешательства оператора. Поэтому для управления системой используется специальное управляющее устройство. Рассмотрим наиболее распространенный вариант, когда в качестве такого устройства используют ЭВМ.

В зависимости от количества контролируемых параметров применяемая ЭВМ может быть более сложной или более простой, но в любом случае она должна обеспечивать получение информации от всех датчиков системы, ее анализ, хранение (при необходимости) и представление оператору. Все эти действия не могут быть выполнены одновременно, поэтому при создании системы контроля определяет-



ся очередность получения информации от датчиков (порядок опроса датчиков), способы анализа информации и порядок ее представления оператору, т. е. разрабатывается алгоритм системы контроля.

Алгоритм, как уже указывалось ранее, представляет собой последовательность действий, ведущих к достижению цели, которая заключается в получении информации о значениях всех технологических параметров. В общих чертах этот алгоритм может быть следующим: проверить работоспособность и готовность ЭВМ и всего оборудования системы, проверить (или задать) границы диапазона номинальных значений и предельные значения всех параметров, после чего провести опрос всех датчиков технологических параметров с анализом полученной от каждого датчика информации. Опрос и анализ могут повторяться с необходимой частотой в течение всего времени работы системы контроля.

Блок-схема алгоритма САК, представлена на рис. 3.1.

Сначала проверяется готовность ЭВМ и оборудования. Проверка готовности ЭВМ обычно предусматривается производителями ЭВМ, поэтому она происходит автоматически при ее включении. Одновременно проверяется готовность внешних устройств, подключенных к ЭВМ, например принтера, плоттера и др.

Проверка оборудования при включении предполагает, в первую очередь, проверку исходного состояния исполнительных механизмов и исходных значений параметров технологического оборудования. Она производится путем опроса датчиков тех параметров, которые являются ключевыми для обеспечения нормальной работы оборудования и нормального протекания данного технологического процесса. Опрос датчиков на этом этапе ничем не отличается от дальнейшего опроса датчиков в ходе технологического процесса, только производится он гораздо реже. Частота проверки работоспособности оборудования выбирается в зависимости от сложности оборудования и технологического процесса и с учетом серьезности последствий возможного сбоя в работе оборудования.

Когда ЭВМ и оборудование готовы, задаются регламентные границы и предельные значения технологических параметров, после чего начинается опрос датчиков этих параметров. Если контролируемый параметр находится в пределах регламентных границ, т. е. с ним все в порядке, то проверяется условие «Опрошены все датчики?». При ответе «Нет» система переходит к контролю очередного параметра; ответ «Да» означает окончание процесса контроля.

Информация об итогах контроля выводится оператору на дисплее ЭВМ в виде сообщения, а также в виде таблиц, графиков, диаграмм или представляется на мнемосхемах, отражающих ход технологи-

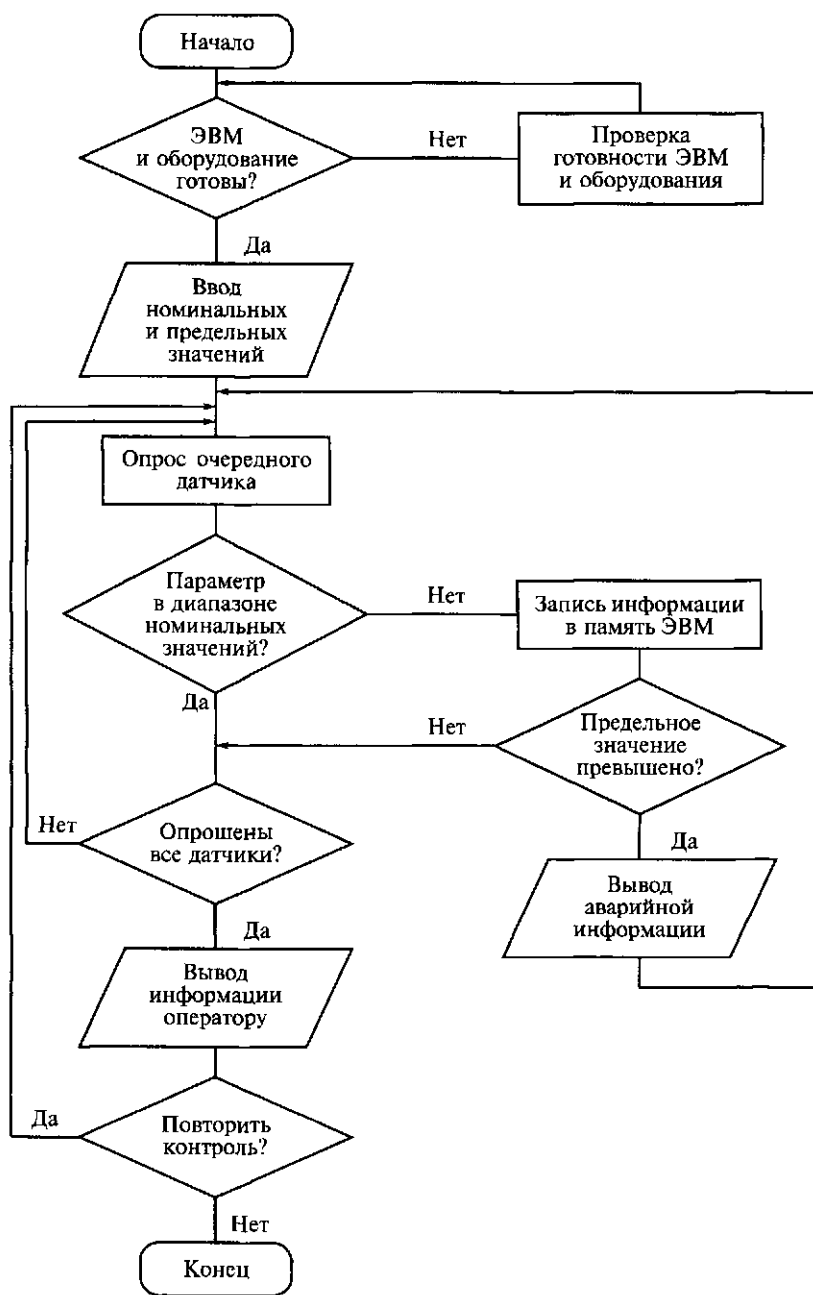


Рис. 3.1. Блок-схема алгоритма САК

ческого процесса. При этом, как правило, информация выдается оператору в соответствующем цвете. Если параметр находится в регламентных границах, то его значение на диаграмме и мнемосхеме отображается зеленым цветом; если за пределами диапазона номинальных значений, то желтым цветом; если параметр превышает предельные значения, то красным цветом.

Если в процессе контроля обнаруживается, что какой-либо параметр находится за пределами диапазона номинальных значений, то сообщение об этом заносится в память ЭВМ: указывается номер или шифр датчика, текущее время, реальное значение параметра и его отклонение от нормы. Затем проверяется условие «Предельное значение превышено?». При положительном ответе на дисплей оператора выдается сообщение об аварийной ситуации, которое обычно помещается в специальном окне на экране (как правило, на красном фоне) и может дублироваться другими средствами оповещения. Если же предельное значение не превышено, то система переходит к опросу очередного датчика, а информация о выходе параметра за пределы диапазона будет сообщена оператору по окончании опроса всех датчиков, как об этом уже было сказано ранее.

После опроса всех датчиков процесс контроля технологических параметров может быть завершен, а может повториться сразу или через некоторое время, заданное оператором.

По аналогичному алгоритму работают системы автоматической диагностики состояния технологического оборудования. Диагностика очень похожа на проверку готовности оборудования к работе, но ее целью является не только определение возможности начать технологический процесс, но и прогноз работоспособности оборудования в ближайшем будущем. Датчики, установленные в различных точках оборудования, передают в ЭВМ информацию о параметрах, которые изменяются в процессе его износа или под действием внешних причин. ЭВМ следит за изменением этих параметров, рассчитывает вероятное время наступления недопустимых отклонений в работе оборудования и сообщает об этом оператору.

### **3.2.3. Технические средства контроля параметров**

Технические средства контроля технологических параметров САК — это комплекс технических устройств, которые позволяют определить значения параметров технологического процесса и передать их в ЭВМ для анализа и представления оператору.

Информация о технологических параметрах поступает от датчиков. Большинство используемых в производстве датчиков формируют сигналы в виде электрического напряжения, тока или сопротивления, поэтому технические средства большинства систем контроля предназначены для обработки именно электрических сигналов.

В подразд. 3.1.3 были рассмотрены различия между аналоговыми и дискретными сигналами. Эти сигналы несут разную информацию, и их обработка происходит по-разному, поэтому рассмотрим средства обработки тех и других сигналов отдельно.

**Технические средства обработки аналоговых сигналов.** Технические средства можно подразделить на пять групп, которые представлены далее в порядке прохождения по ним сигналов на пути от датчиков к ЭВМ.

1. **Переходные устройства (ПУ).** Они передают сигналы от датчиков к аппаратуре системы контроля. Дело в том, что датчики, как правило, располагаются непосредственно на технологическом оборудовании, а система контроля располагается обычно там, где находится оператор. Расстояние между ними может достигать сотен и даже тысяч метров.

Для передачи электрических сигналов на эти расстояния используют специальные соединительные провода и кабели, которые вместе с клеммными колодками, кабельными разъемами и другими подобными элементами и составляют группу переходных устройств.

2. **Устройства нормализации сигналов (УНС).** Эти устройства необходимы для приведения сигналов в нормальное состояние. Пройдя сотни метров по проводам и кабелям, электрические сигналы неизбежно искажаются из-за воздействия внешних электромагнитных полей и неидеальных параметров соединительных линий. Устройства нормализации обеспечивают сглаживание и фильтрацию сигналов, смещение уровня, преобразование тока в напряжение, линеаризацию и другие модификации сигналов, делающие более удобной их дальнейшую обработку.

3. **Коммутаторы (К).** Это электронные или электромеханические переключатели, позволяющие поочередно подавать сигналы с различных датчиков на измерительные и другие устройства. Коммутаторы должны работать быстро, чтобы даже при большом количестве датчиков суммарное время контроля всех параметров не было слишком большим.

4. **Усилители (У).** Многие сигналы, поступающие с датчиков, представляют собой электрическое напряжение очень низкого уровня — сотые и даже тысячные доли вольта. Такое маленькое напряжение

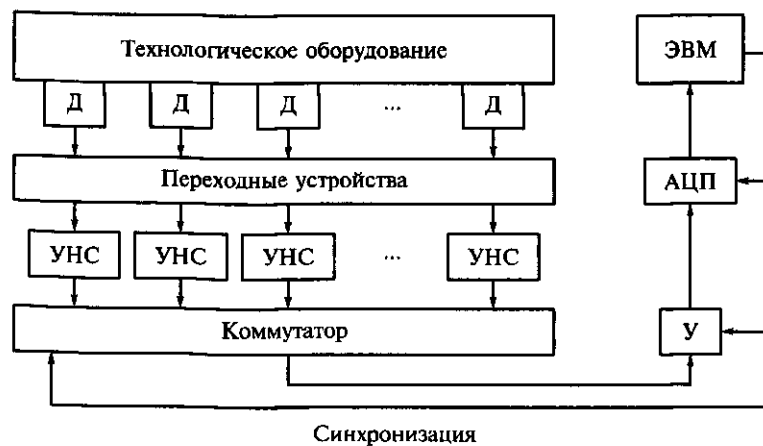


Рис. 3.2. Структура технических средств обработки аналоговых сигналов САК:  
Д — датчик

трудно измерить, особенно если нужно знать значение параметра с большой точностью.

Современные измерительные средства обеспечивают высокую точность измерения напряжения в диапазоне от 0,1 В до нескольких вольт, а тока — в диапазоне от 0,1 мА до нескольких миллиампер. Сигналы более низкого уровня должны быть усилены так, чтобы их значения попали в этот диапазон. Эту функцию выполняют усилители различных типов, имеющие необходимый коэффициент усиления.

Обычно количество усилителей намного меньше, чем количество датчиков, и сигналы от датчиков подаются на усилители поочередно через коммутатор.

5. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Конечной точкой цепочки технических средств, по которой проходят сигналы, является ЭВМ. Однако она оперирует с числами и воспринимает информацию только в числовом виде. Обычно это двоичные числа, состоящие из нулей и единиц, т. е. представляющие собой двоичный цифровой код. Для того чтобы ЭВМ могла обрабатывать аналоговые сигналы датчиков, эти сигналы должны быть преобразованы в цифровой код, что и делают аналого-цифровые преобразователи.

Согласование работы АЦП, усилителей и коммутатора производит ЭВМ с помощью сигналов синхронизации.

Примерная структура технических средств обработки аналоговых сигналов САК представлена на рис. 3.2.

**Технические средства обработки дискретных сигналов.** Технические средства можно подразделить на три группы, которые также представлены далее в порядке прохождения сигналов к ЭВМ.

1. Переходные устройства. Они выполняют те же задачи, что и при обработке аналоговых сигналов.

2. Устройства нормализации сигналов. Их функции иные, чем у аналогичных устройств обработки аналоговых сигналов. Дискретные сигналы, поступающие от дискретных датчиков, имеют одно из двух значений информативного параметра сигнала — электрического напряжения: его значение может быть либо низким (в частном случае нуль), либо высоким (обычно это напряжение 5 В). Низкий уровень сигнала считают соответствующим логическому нулю (0), а высокий — логической единице (1). Например, сигнал 0 от какого-либо датчика может нести информацию о замкнутом состоянии контактов связанной с этим датчиком электрической цепи, а сигнал 1 от того же датчика означает, что контакты в этой цепи разомкнуты. Или сигнал 0 поступает от датчика при открытом клапане, а сигнал 1 — при закрытом клапане и т. д.

В процессе передачи сигналов по кабелям они могут быть искажены различными внешними воздействиями и уровни сигналов могут отличаться от 0 и 5 В, но эти искажения не настолько велики, чтобы возникли сомнения в логическом значении сигнала: 0 или 1. Поэтому устройства нормализации дискретных сигналов — это так называемые пороговые устройства, сравнивающие значения сигналов с некоторым пороговым уровнем. Их задача — четкое различение сигналов 0 и 1. Они формируют выходной сигнал 1 (например, в виде напряжения 5 В на выходе УНС), если входное напряжение выше некоторого порога (например, 4 В), и сигнал 0 (напряжение на выходе УНС равно нулю), если входное напряжение ниже заданного порога (например, 1 В).

Сигналы, поступающие с выходов УНС, являются стандартными и потому совместимыми с устройствами, на которые дискретные сигналы поступают для дальнейшей обработки, — регистрами и счетчиками.

3. Регистры и счетчики. Основная задача технических средств обработки дискретных сигналов заключается в регистрации двоичных дискретных сигналов (типа «включен—выключен», «есть—нет», «открыт—закрыт») и подсчете многократно повторяющихся единичных событий (количества деталей, проходящих на конвейере мимо датчика; количества контейнеров, погруженных в трюм баржи, и т. д.). Далее эта информация поступает в ЭВМ для запоминания, учета, вывода оператору и т. д.

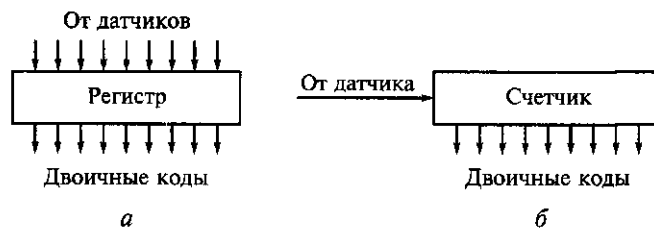


Рис. 3.3. Графические обозначения регистра (а) и счетчика (б)

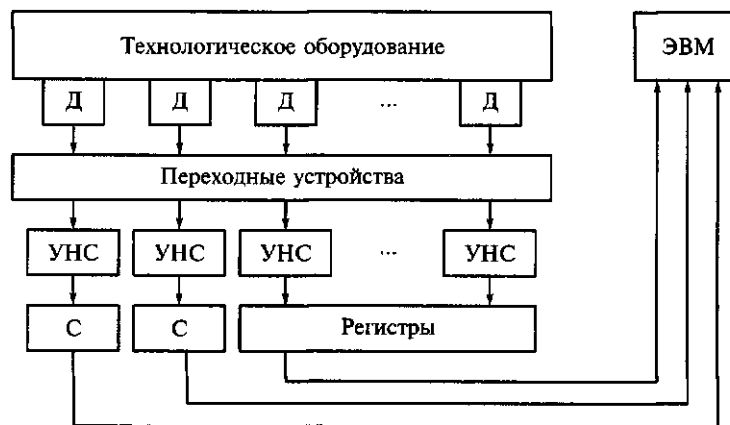


Рис. 3.4. Структура технических средств обработки дискретных сигналов САК:

С — счетчик

Наиболее естественная форма передачи информации в ЭВМ — в виде двоичных кодов, т. е. последовательности единиц и нулей. Поэтому средства обработки дискретных сигналов сконструированы так, что они формируют из полученных сигналов двоичные коды. Для этого устройства, регистрирующие одиночные дискретные сигналы, объединяются в *регистры*, которые получают параллельно сигналы от целой группы дискретных датчиков. Совокупность зарегистрированных сигналов в виде двоичного кода передается из регистра в ЭВМ (рис. 3.3, а).

Подсчет повторяющихся единичных событий производят *счетчики*, которые выражают результат подсчета количества импульсов в виде двоичного числа, удобного для передачи в ЭВМ (рис. 3.3, б).

Возможная структура технических средств обработки дискретных сигналов САК представлена на рис. 3.4.

Комбинирование рассмотренных ранее технических средств позволяет создавать системы автоматического контроля с разными характеристиками для различных технологических процессов.

### **3.3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

#### **3.3.1. Алгоритм системы автоматического управления**

Любой технологический процесс совершается в соответствии с алгоритмом, ведущим к достижению поставленной цели — получению нужного продукта, изделия или иного запланированного результата. И выпечка хлеба, и управление полетом самолета, и изготовление карандашей, и производство автомобильных двигателей — все эти процессы представляют собой последовательности операций, выполняемых различными механизмами, в том числе автоматически, в соответствии с алгоритмом.

Поскольку последовательность операций в любом технологическом процессе известна заранее, всегда можно создать управляющее устройство, которое будет формировать управляющие воздействия на исполнительные механизмы в точном соответствии с алгоритмом, и поручить ему автоматическое ведение процесса. Такой способ управления технологическими процессами используется, но он применим только к самым простым процессам.

Дело в том, что в реальных условиях по разным причинам всегда существуют отклонения параметров процессов и оборудования от идеальных, предусмотренных в алгоритме. Эти отклонения могут привести к недопустимым нарушениям хода технологического процесса и в конечном счете к выпуску бракованных изделий и другим негативным последствиям. Поэтому за параметрами надо следить, для чего обычно используют САК.

Система автоматического контроля выдает полную информацию о всех параметрах технологического процесса и оборудования, в том числе об отклонениях значений параметров от номинальных. Но если отклонение произошло и зарегистрировано системой контроля, то что делать дальше? В автоматизированной системе управления решение об этом принимает оператор, в автоматической системе решение должно принимать управляющее устройство. Оно на основе анализа информации о параметрах формирует корректирующий управляющий сигнал для исполнительного механизма, который и



возвращает параметр к номинальному значению. Результатом работы исполнительного механизма могут быть, например, перемещение обрабатывающего инструмента, включение нагревателя на какой-то период времени, создание дополнительного усилия и т. д.

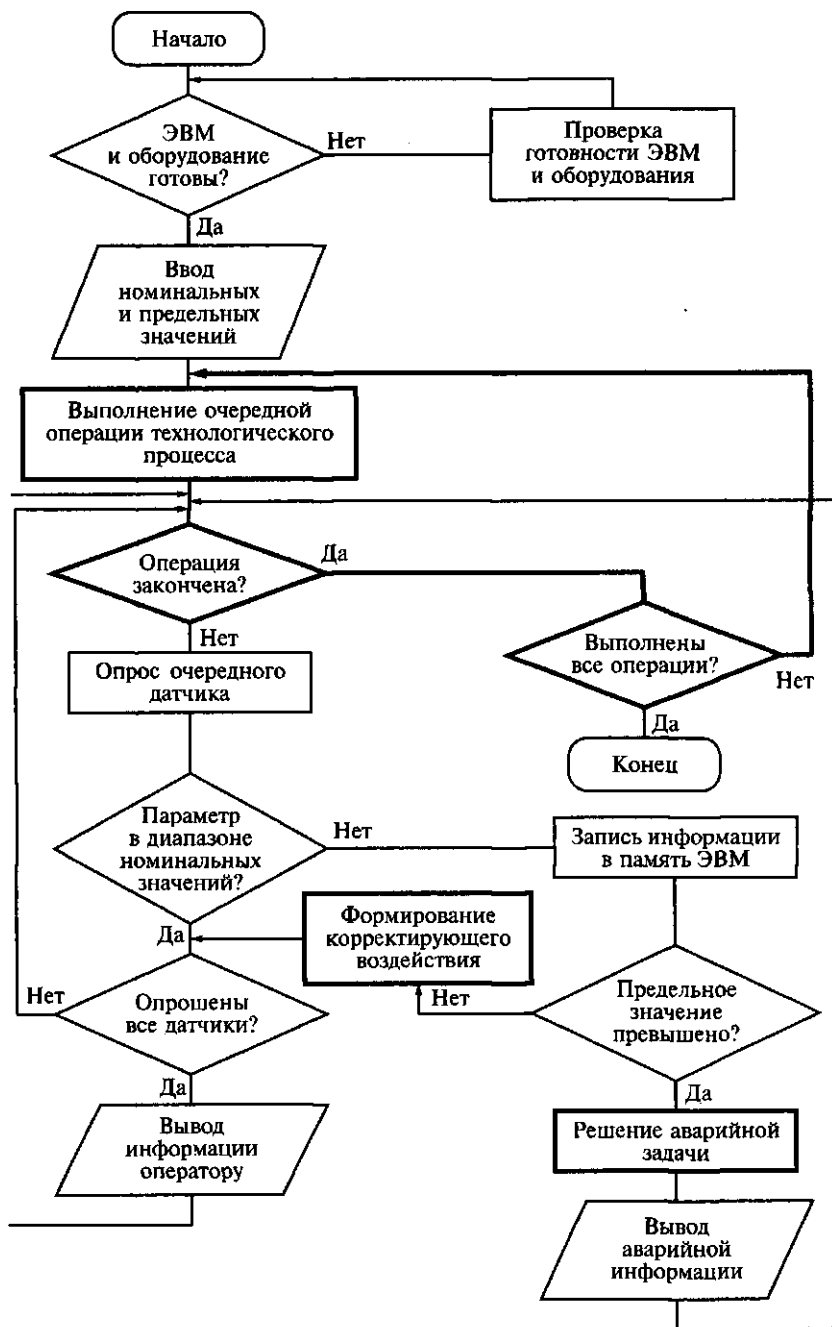
Если система контроля выдала сообщение о превышении параметром предельного значения и возникновении аварийной ситуации, то управляющее устройство решает так называемую аварийную задачу. Для таких ситуаций разрабатывают специальные алгоритмы, которые система управления должна максимально быстро выполнить, чтобы избежать непоправимых последствий. Аварийный алгоритм предусматривает не только воздействие на исполнительный механизм, непосредственно влияющий на отклонившийся параметр, но и формирование других воздействий, предупреждающих и исключающих дальнейшее аварийное развитие процесса.

Мы рассмотрели реакцию системы управления на информацию, поступающую от системы контроля. Однако главной задачей системы управления является ведение технологического процесса, и формируемые ею воздействия на исполнительные механизмы определяются, в первую очередь, алгоритмом этого процесса, а параллельно проводится контроль всех прочих параметров.

Параллельное выполнение этих задач оказывается возможным потому, что любая операция технологического процесса всегда продолжается какое-то время, значительно большее времени опроса одного датчика. За время выполнения одной операции можно собрать информацию о многих параметрах и при отклонении каких-либо из них от нормы выдать управляющие сигналы на соответствующие исполнительные механизмы. Когда текущая операция технологического процесса завершится, в соответствии с алгоритмом процесса управляющее устройство сформирует сигнал для начала следующей операции, во время которой будет опрошена очередная группа датчиков, и т. д.

Так как система контроля является существенной частью системы автоматического управления, алгоритм САУ строится на базе уже рассмотренного алгоритма САК. Блок-схема алгоритма САУ представлена на рис. 3.5. В нем выделены элементы, обеспечивающие непосредственно управление как ходом технологического процесса, так и корректировкой параметров, вышедших за пределы диапазона номинальных значений.

Поскольку система управления ведет весь технологический процесс, то время работы САУ равно длительности этого процесса. Опрос же датчиков происходит гораздо быстрее, чем выполняются технологические операции, и за время выполнения алгоритма ТП



ис. 3.5. Блок-схема алгоритма САУ

опрос всех датчиков может проводиться многократно. Информация о результатах каждого опроса выводится оператору, после чего начинается новый цикл опроса. Поэтому в отличие от алгоритма САК, который заканчивается после опроса всех датчиков и ждет команду оператора, алгоритм САУ заканчивается только после выполнения последней операции технологического процесса.

### 3.3.2. Технические средства управления

Подобно контролируемым параметрам, управляющие воздействия на оборудование, выполняющие операции технологического процесса, можно подразделить на аналоговые и дискретные. Аналоговые воздействия на исполнительные механизмы используют, если нужно, например, открыть вентиль на 56 % или повернуть платформу на 12°. Дискретные воздействия позволяют выполнить единичные действия, например включить насос или закрыть клапан.

Исполнительные механизмы, выполняющие аналоговые и дискретные воздействия на оборудование, различны, и весь комплекс технических средств для реализации аналоговых воздействий организован иначе, чем для дискретных воздействий.

**Технические средства формирования аналоговых воздействий.** Их можно подразделить на шесть групп, которые представлены далее в порядке прохождения сигналов от ЭВМ (рис. 3.6).

1. Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Их функция — преобразование двоичных чисел, поступающих от ЭВМ и несущих информацию об управляющем воздействии, в аналоговый сигнал (обычно в электрическое напряжение), необходимый для управления аналоговыми исполнительными механизмами. Обычно один ЦАП используется для управления несколькими механизмами, которые обслуживаются им поочередно.

2. Коммутаторы. Это электронные или электромеханические переключатели, обеспечивающие передачу сигналов от ЦАП к различным исполнительным механизмам.

3. Запоминающие устройства (ЗУ). Это аналоговые устройства, которые сохраняют значение управляющего сигнала, поступающего от ЦАП на исполнительный механизм, в течение всего времени работы ИМ.

Дело в том, что исполнительный механизм — устройство медленное (по сравнению с ЭВМ, ЦАП и другими электронными устройствами). Но для выполнения действия, предписанного управляющим

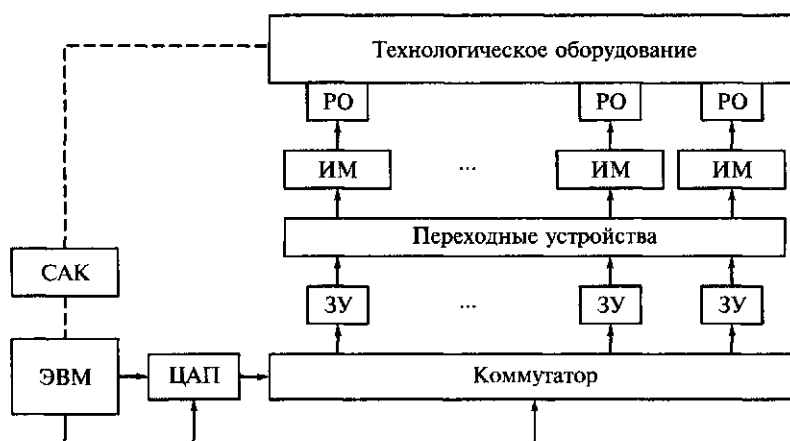


Рис. 3.6. Структура технических средств формирования аналоговых воздействий САУ

сигналом, этот сигнал должен подаваться на ИМ в течение всего времени выполнения действия. Если ЦАП, а тем более ЭВМ, будут дожидаться окончания работы исполнительного механизма и только после этого переходить к обслуживанию следующего исполнительного механизма, то это резко замедлит работу всей системы и ход технологического процесса.

Поэтому ЦАП, сформировав сигнал для данного исполнительного механизма, передает его через коммутатор на соответствующее запоминающее устройство и переходит к преобразованию следующего двоичного числа, поступающего с ЭВМ, т. е. к формированию управляющего сигнала для другого исполнительного механизма.

4. Переходные устройства. Их функция — донести управляющие сигналы до исполнительных механизмов, расположенных на технологическом оборудовании или вблизи него.

Управляющие сигналы достаточно мощные, поэтому, с одной стороны, не требуется их тщательная защита от помех, как в системах контроля, а с другой стороны, экранирование кабелей, несущих мощные сигналы, существенно уменьшает их влияние на проложенные неподалеку цепи информационных сигналов систем контроля.

5. Исполнительные механизмы (ИМ). Они оказывают воздействие на рабочие органы в соответствии с управляющим сигналом. Например, исполнительный механизм с электродвигателем перемещает

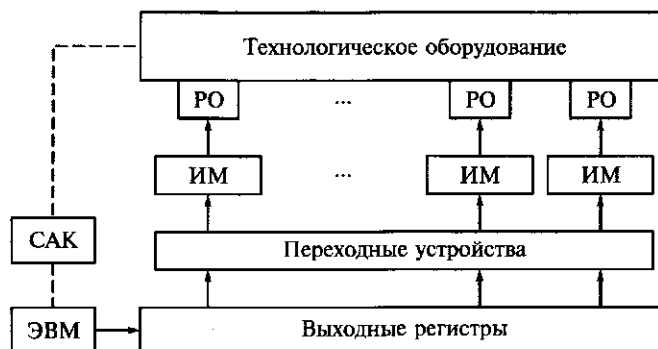


Рис. 3.7. Структура технических средств формирования дискретных воздействий САУ

каретку с режущим инструментом на расстояние, которое зависит от времени действия управляющего сигнала на двигатель.

6. Рабочие органы (РО), называемые также регулирующими органами. Они оказывают воздействие непосредственно на технологический процесс. Так, перемещение каретки на 20 мм приводит к обработке инструментом поверхности заготовки на участке длиной 20 мм; прикрытие заслонки на 5 % приводит к уменьшению расхода газа на 5% и т. д.

**Технические средства формирования дискретных воздействий.** Их можно подразделить на четыре группы (рис. 3.7).

1. Выходные регистры (РГ). Они используются для запоминания дискретных управляющих сигналов, вырабатываемых ЭВМ в виде двоичного цифрового кода, и для управления дискретными исполнительными механизмами.

2. Переходные устройства (ПУ). О них уже было сказано ранее. Мощные дискретные сигналы являются источником сильных импульсных помех, поэтому кабели с ними должны быть тщательно экранированы.

3. Исполнительные механизмы (ИМ). Это дискретные элементы, у которых количество рабочих состояний выражается целым числом (в большинстве случаев 2): электронные и электромагнитные реле, шаговые двигатели, пневмо- и гидроприводы.

4. Рабочие (регулирующие) органы дискретного действия. Они оказывают воздействие на технологический процесс дискретно, не столько регулируя значение того или иного параметра процесса, сколько устанавливая режим работы оборудования.

### 3.4.1. Принципы регулирования

Отличительной особенностью САР по отношению к САК и САУ является ее работа лишь с одним технологическим параметром и соответственно с одним исполнительным механизмом, воздействующим на этот параметр.

Задача САР — поддержание постоянного значения регулируемого параметра или его изменение по заданному закону.

Работа систем автоматического регулирования основана на двух основных принципах регулирования:

- 1) по отклонению регулируемого параметра от заданного значения или закона;
- 2) по компенсации внешних возмущающих воздействий на технологический процесс.

В первом случае автоматическая система должна следить за значением параметра и при его отклонении от заданного создавать такое управляющее воздействие на исполнительный механизм, которое обеспечит возврат параметра к нужному значению.

Откуда система знает, каким должно быть значение параметра? Для ввода в систему этой информации используют устройство, называемое задатчиком. Оно формирует такой же сигнал, какой поступает с датчика при значении регулируемого параметра, равном заданному. Если отклонения параметра нет, то оба сигнала одинаковы и система регулирования находится в равновесии. При отклонении значения параметра от заданного, вызванном возмущающим воздействием на технологический процесс, специальное устройство сравнения обнаруживает разницу между сигналами, усиливает ее, превращает в двоичный код и передает на ЭВМ, которая вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм.

Совокупность устройства сравнения, усилителя, аналого-цифрового преобразователя и ЭВМ, роль которой, как правило, выполняет микропроцессор, можно рассматривать как *регулирующее устройство* (РУ) (рис. 3.8).

Исполнительный механизм управляет рабочим органом, действующим на технологический процесс, так, чтобы отклонение параметра от заданного значения уменьшалось. Воздействие продолжается до тех пор, пока реальное значение регулируемого параметра не станет вновь равным заданному. Если заданное значение параметра (и со-

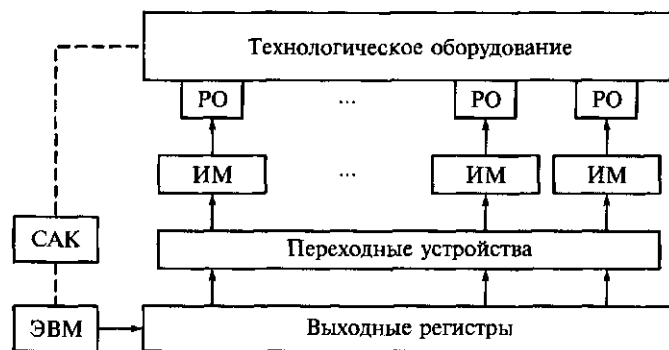


Рис. 3.7. Структура технических средств формирования дискретных воздействий САУ

каретку с режущим инструментом на расстояние, которое зависит от времени действия управляющего сигнала на двигатель.

6. Рабочие органы (РО), называемые также регулирующими органами. Они оказывают воздействие непосредственно на технологический процесс. Так, перемещение каретки на 20 мм приводит к обработке инструментом поверхности заготовки на участке длиной 20 мм; закрытие заслонки на 5 % приводит к уменьшению расхода газа на 5% и т.д.

#### Технические средства формирования дискретных воздействий.

Их можно подразделить на четыре группы (рис. 3.7).

1. Выходные регистры (РГ). Они используются для запоминания дискретных управляющих сигналов, вырабатываемых ЭВМ в виде двоичного цифрового кода, и для управления дискретными исполнительными механизмами.

2. Переходные устройства (ПУ). О них уже было сказано ранее. Мощные дискретные сигналы являются источником сильных импульсных помех, поэтому кабели с ними должны быть тщательно экранированы.

3. Исполнительные механизмы (ИМ). Это дискретные элементы, у которых количество рабочих состояний выражается целым числом (в большинстве случаев 2): электронные и электромагнитные реле, шаговые двигатели, пневмо- и гидроприводы.

4. Рабочие (регулирующие) органы дискретного действия. Они оказывают воздействие на технологический процесс дискретно, не столько регулируя значение того или иного параметра процесса, сколько устанавливая режим работы оборудования.

### 3.4.1. Принципы регулирования

Отличительной особенностью САР по отношению к САК и САУ является ее работа лишь с одним технологическим параметром и соответственно с одним исполнительным механизмом, воздействующим на этот параметр.

Задача САР — поддержание постоянного значения регулируемого параметра или его изменение по заданному закону.

Работа систем автоматического регулирования основана на двух основных принципах регулирования:

- 1) по отклонению регулируемого параметра от заданного значения или закона;
- 2) по компенсации внешних возмущающих воздействий на технологический процесс.

В первом случае автоматическая система должна следить за значением параметра и при его отклонении от заданного создавать такое управляющее воздействие на исполнительный механизм, которое обеспечит возврат параметра к нужному значению.

Откуда система знает, каким должно быть значение параметра? Для ввода в систему этой информации используют устройство, называемое датчиком. Оно формирует такой же сигнал, какой поступает с датчика при значении регулируемого параметра, равном заданному. Если отклонения параметра нет, то оба сигнала одинаковы и система регулирования находится в равновесии. При отклонении значения параметра от заданного, вызванном возмущающим воздействием на технологический процесс, специальное устройство сравнения обнаруживает разницу между сигналами, усиливает ее, превращает в двоичный код и передает на ЭВМ, которая вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм.

Совокупность устройства сравнения, усилителя, аналого-цифрового преобразователя и ЭВМ, роль которой, как правило, выполняет микропроцессор, можно рассматривать как *регулирующее устройство (РУ)* (рис. 3.8).

Исполнительный механизм управляет рабочим органом, действующим на технологический процесс, так, чтобы отклонение параметра от заданного значения уменьшалось. Воздействие продолжается до тех пор, пока реальное значение регулируемого параметра не станет вновь равным заданному. Если заданное значение параметра (и со-



ответственно сигнал, поступающий от задатчика) не изменяется с течением времени, то система называется *стабилизирующей*.

Если сигнал, формируемый задатчиком, изменяется по какому-то закону, то система регулирования следит за тем, чтобы сигнал с датчика параметра изменялся точно так же, т. е. чтобы параметр изменялся по тому же закону. Задатчик задает тот закон, по которому должен изменяться параметр. Возможны два варианта формирования такого сигнала задатчиком: либо в соответствии с заранее составленной программой изменения параметра с течением времени (в этом случае САР называют системой *программного регулирования*), либо в зависимости от изменения какого-то другого параметра, за которым следит задатчик (в этом случае САР называют *следящей*). В любом случае действия системы направлены на устранение отклонения параметра от значения (постоянного или изменяющегося), определенного задатчиком.

На рис. 3.8, а показана структура технических средств САР по отклонению параметра.

Достоинство регулирования по отклонению заключается в том, что регулируемый параметр всегда находится под контролем автоматической системы. Но есть и недостаток — процесс регулирования начинается лишь тогда, когда отклонение параметра от заданной величины уже не только появилось, но и достигло порога чувствительности устройства сравнения. Например, в помещении установлена система автоматического регулирования температуры по отклонению. До тех пор пока не появилось внешнее воздействие, температура равна 20 °С. Датчик температуры установлен в центре

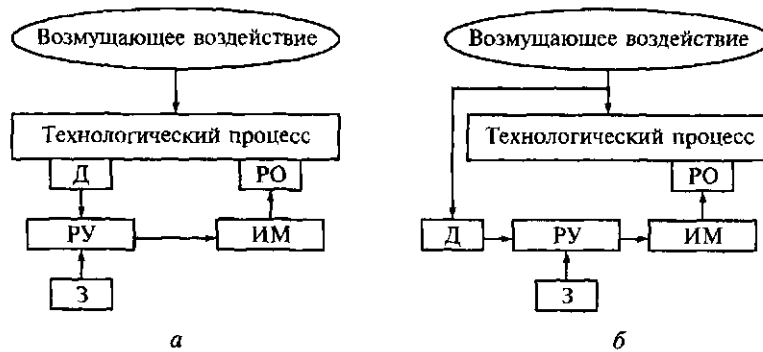


Рис. 3.8. Структура технических средств САР по отклонению (а) и по возмущению (б):

З — задатчик

помещения. Кто-то открыл окно на улицу, где температура равна  $-20^{\circ}\text{C}$ . Температура у открытого окна начинает резко падать, однако в центре комнаты она еще не изменилась, следовательно, регулятор пока не действует. Только после того как в половине помещения похолодает и температура начнет падать вблизи датчика, регулятор вступит в действие.

Этот недостаток регулирования по отклонению отсутствует в системе регулирования по компенсации возмущающих воздействий. Структура технических средств такой системы приведена на рис. 3.8, б.

Ее отличие от предыдущей структуры заключается в том, что на датчик воздействует не параметр технологического процесса, а внешнее возмущение. Обычно влияние возмущающего воздействия на технологические параметры проявляется с некоторой задержкой, что позволяет выработать регулирующее воздействие на рабочий орган еще до того, как параметр под действием возмущения изменит свое значение.

При регулировании температуры в помещении можно пойти и по пути компенсации возмущающего воздействия. После открытия окна система получает информацию о том, насколько оно открыто, какова площадь окна, какова температура за окном и т. д. На основе полученной информации она вырабатывает управляющее воздействие на нагреватель еще до того, как регулируемый параметр (температура в центре комнаты) изменит свое значение.

Такая оперативность является достоинством этого принципа регулирования, но отсутствие непосредственного контроля самого регулируемого параметра — его недостаток.

Наиболее совершенны комбинированные САР, использующие одновременно оба принципа регулирования. При этом сохраняются достоинства обоих принципов и уменьшаются их недостатки.

Особый вид САР — системы адаптивного регулирования. Они используются для поддержания оптимальных режимов тех технологических процессов, для которых может быть определен показатель эффективности процесса. Если этот показатель зависит от параметров, которые система может учесть, то появляется возможность добиться максимального значения эффективности. Адаптивная система автоматически корректирует управление процессом в зависимости от комплекса таких воздействий на него, учесть которые по отдельности невозможно (изменение качества сырья, отложения на стенках трубопровода и т. д.).

Работает адаптивная САР следующим образом: ЭВМ изменяет на небольшую величину параметры в алгоритмах управления и вычис-

ляет показатель эффективности при новых значениях параметров. Если показатель растет, то ЭВМ вновь изменяет параметры в том же направлении и вновь вычисляет показатель эффективности. И так до тех пор, пока не будет достигнута максимальная эффективность. Периодическое проведение такой коррекции обеспечивает оптимальный режим технологического процесса и работы технологического оборудования.

### 3.4.2. Устойчивость систем автоматического регулирования

Любая система автоматического регулирования должна поддерживать регулируемый параметр с максимальной точностью, т. е. с наименьшим отклонением от заданного значения. Это достигается обычно за счет повышения чувствительности устройства сравнения. Однако чрезмерное повышение чувствительности может привести к потере устойчивости системы и возникновению колебаний.

Действительно, если в системе регулирования высоты полета самолета чувствительность слишком высока, то даже при незначительных отклонениях самолета от заданной высоты (встретившаяся на земле копна сена) на рулевые органы поступает большой сигнал, вызывающий их отклонение на большой угол. Самолет обладает значительной инерционностью, а значит, продолжает реагировать на этот сигнал и изменять высоту полета, даже если сигнал уже закончился, а может быть, даже изменил свой знак на обратный. В конечном счете это ведет к увеличению амплитуды колебаний высоты полета и потере устойчивости.

*Устойчивость* — это способность системы самостоятельно возвращаться в состояние равновесия после прекращения воздействия, вызвавшего нарушение равновесия.

Процесс перехода системы в новое состояние после возмущающего воздействия на нее (или возврата системы к прежнему состоянию после прекращения воздействия) называется *переходным процессом*. Поведение системы в переходном процессе отражает ее устойчивость. Если при очень малых воздействиях в системе возникают колебания со все возрастающей амплитудой, то такая система является неустойчивой. Система, в которой колебания не возникают или возникающие колебания затухают в процессе ее возврата к состоянию равновесия, считается устойчивой. На самой границе устойчивости в системе могут возникнуть незатухающие колебания с постоянной небольшой амплитудой.

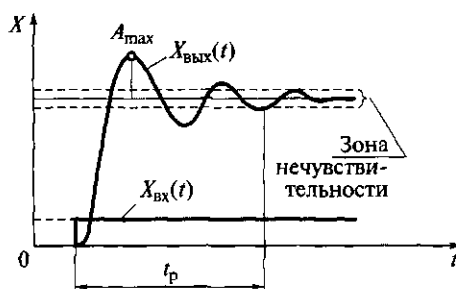


Рис. 3.9. Переходной процесс в системе автоматического регулирования

Качество регулирования оценивается двумя показателями: наибольшим отклонением  $A_{\max}$  регулируемого параметра от требуемого значения во время переходного процесса и временем регулирования  $t_p$  (длительностью переходного процесса) (рис. 3.9). Время регулирования отсчитывается с момента поступления возмущающего воздействия  $X_{\text{вх}}(t)$  на вход системы до момента окончания переходного процесса, когда регулируемый параметр  $X_{\text{вых}}(t)$  будет отличаться от требуемого значения на очень малую величину (так называемая зона нечувствительности).

### 3.4.3. Характеристики звеньев САР

Система автоматического регулирования представляет собой совокупность отдельных элементов и технических средств: датчиков, усилителей, преобразователей, запоминающих устройств, исполнительных механизмов и рабочих органов. В автоматике каждое из них называют *звеном* и рассматривают с точки зрения их реакции на входное воздействие.

Реакция может быть различной. Например, изменение сигнала на входе электронного усилителя, работающего в линейном режиме, приводит к пропорциональному изменению сигнала на его выходе, следовательно, электронный усилитель — *пропорциональное звено*.

Изменение сигнала на входе исполнительного механизма, например электрического двигателя, приводит обычно к плавному изменению частоты вращения до нового значения. Так проявляются инерционные свойства двигателя, следовательно, электрический двигатель — *инерционное звено*.

При этом не имеет значения, какова физическая природа звеньев или их конструктивное исполнение, главное — как изменяется выходная величина  $X_{\text{вых}}(t)$  при том или ином воздействии  $X_{\text{вх}}(t)$  на входе звена.

Отношение выходной величины к входной называется *передаточной функцией*, а характер изменения выходной величины во времени при сигнале прямоугольной формы на входе звена (переходной процесс) называется *переходной характеристикой* звена. Если известна переходная характеристика, то можно вычислить реакцию звена на любое входное воздействие и прогнозировать поведение системы.

В системах автоматического регулирования различают пять типов звеньев:

- пропорциональное;
- инерционное;
- интегрирующее;
- дифференцирующее;
- колебательное.

В *пропорциональном* звене выходная величина повторяет без искажений и запаздывания входную величину (рис. 3.10, а). В качестве примеров пропорциональных звеньев можно привести делитель напряжения, состоящий из двух резисторов (напряжение на каждом резисторе в точности повторяет напряжение, поданное на делитель, но меньше его по значению); рычаг (перемещение одного конца рычага повторяет в масштабе перемещение другого его конца).

В *инерционном* звене при скачкообразном изменении входной величины выходная величина стремится к новому установившемуся значению по экспоненциальному закону (рис. 3.10, б). Этот закон

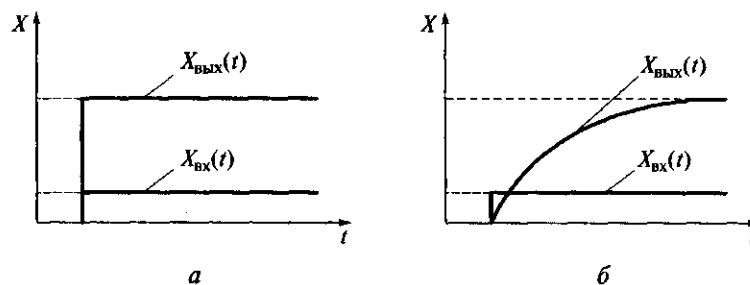


Рис. 3.10. Переходные характеристики пропорционального [а] и инерционного [б] звеньев

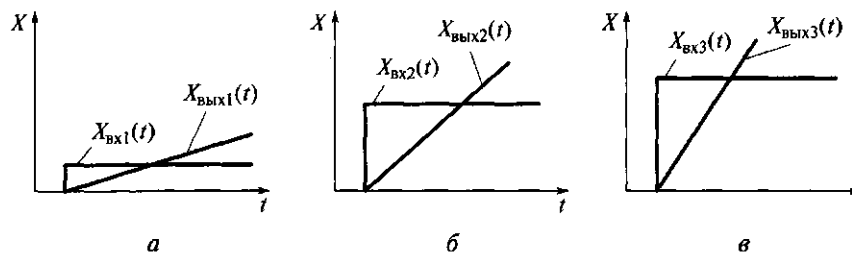


Рис. 3.11. Переходные характеристики (а...в) интегрирующего звена при различных значениях входной величины

выражает инерционность звена, которая приводит к задержке реакции звена на внешнее воздействие.

В реальных звеньях инерционность обусловлена наличием в звене большой массы, момента инерции или электрической емкости. Например, чем больше момент инерции ротора двигателя, тем дольше он будет разгоняться до установившейся частоты вращения при подаче на него напряжения питания в качестве входного воздействия. Чем больше емкость конденсатора, тем дольше он будет заряжаться до величины приложенного напряжения.

В *интегрирующем* звене выходная величина пропорциональна интегралу от входной величины. Известно, что интеграл постоянной величины представляет собой линейно (т.е. равномерно) увеличивающуюся или уменьшающуюся величину, причем чем больше входная величина, тем больше скорость изменения выходной величины (рис. 3.11).

Если входная величина мгновенно изменяется от одного постоянного значения до другого, то выходная величина растет или убывает линейно с углом наклона, зависящим от скачка значения входной величины (например, напряжение на конденсаторе в электрической цепи изменяется пропорционально интегралу от тока заряда конденсатора, рассматриваемого как входное воздействие).

В *дифференцирующем* звене выходная величина пропорциональна производной (дифференциалу) от входной величины. Производная от любой величины, изменяющейся с течением времени, равна скорости ее изменения (рис. 3.12, а). Чем больше скорость изменения сигнала на входе, тем больше значение выходной величины. Если входная величина изменяется ступенчато (скачком), т.е. с огромной скоростью, то значение сигнала на выходе теоретически становится бесконечно большим. В действительности существуют различные причины, которые ограничивают и скорость изменения входного

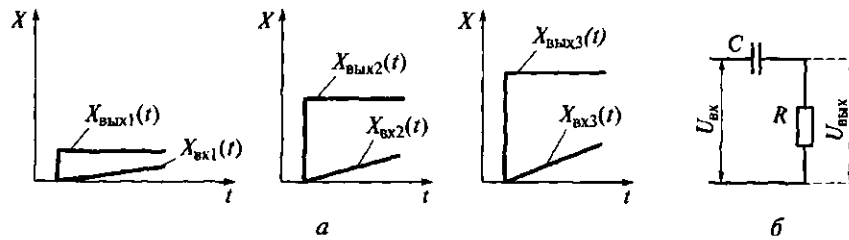


Рис. 3.12. Дифференцирующее звено:  
 а – переходные характеристики; б –  $RC$ -цепочка

сигнала, и максимальное значение выходного сигнала. В качестве примера дифференцирующего звена можно привести  $RC$ -цепочку (рис. 3.12, б), состоящую из резистора и конденсатора и широко применяющуюся в электронике для получения коротких импульсов.

В колебательном звене скачкообразное воздействие на входе приводит к колебаниям выходной величины относительно нового установившегося значения. На рис. 3.13, а показана реальная переходная характеристика, отличающаяся наличием начального участка медленного нарастания выходной величины, что связано с неизбежной инерционностью реальных объектов. Если колебания затухают, то звено является устойчивым.

В качестве примера можно привести пружинный амортизатор автомобиля: когда в кузов помещают груз, кузов вместе с грузом проседает и совершает несколько колебаний прежде, чем примет устойчивое положение. Инерционность звена проявляется в том, что, когда груз касается кузова, в первое мгновение из-за инерции кузов

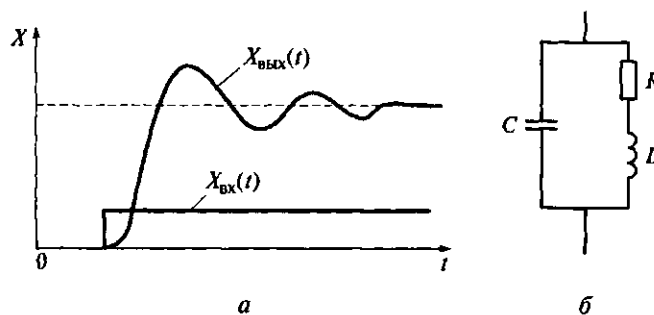


Рис. 3.13. Колебательное звено:  
 а – реальная переходная характеристика; б – колебательный контур

с грузом начинает движение вниз медленно, затем все больше ускоряется под тяжестью груза и одновременно начинает воспринимать действие амортизатора. В качестве примера можно также привести колебательный контур, состоящий из конденсатора  $C$  и катушки индуктивности  $L$  (рис. 3.13, б). При подаче на эту цепь напряжения в ней возникают колебания, которые затухают тем быстрее, чем больше активное сопротивление катушки  $R$ .

Такое разнообразие характеристик звеньев позволяет создавать системы автоматического регулирования с различными воздействиями на рабочие органы технологического процесса в зависимости от вида регулируемого параметра и влияния этого параметра на свойства конечного продукта.

При отклонении регулируемого параметра от заданного значения воздействие на рабочий орган организуют по одному из четырех законов регулирования:

- интегральный (И-регулятор);
- пропорциональный (П-регулятор);
- пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор);
- пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-регулятор).

*Интегральный* регулятор формирует воздействие на рабочий орган, которое линейно возрастает или убывает до тех пор, пока регулируемый параметр не вернется к заданному значению. Эти регуляторы наиболее просты в реализации, но процесс регулирования носит колебательный характер и система может оказаться неустойчивой.

*Пропорциональный* регулятор воздействует на рабочий орган тем сильнее, чем больше отклонение регулируемого параметра от заданного значения. Устойчивость таких регуляторов выше, чем интегральных, но им свойственна так называемая статическая погрешность, т. е. после отработки входного воздействия новое установившееся значение параметра всегда немного отличается от заданного.

*Пропорционально-интегральный* регулятор совмещает оба способа регулирования. Рабочий орган воспринимает суммарное воздействие, поэтому в ПИ-регуляторах достигается высокое быстродействие, обеспечивается устойчивость регулирования и отсутствует статическая погрешность. Именно ПИ-регуляторы широко применяются при автоматизации технологических процессов.

В *пропорционально-интегрально-дифференциальных* регуляторах к воздействию на рабочий орган, формируемому ПИ-регулятором, добавляется составляющая, пропорциональная скорости изменения





отклонения регулируемого параметра от заданного значения. Это обеспечивает наибольшую эффективность ПИД-регуляторов, но у них сложная наладка.

Реальные автоматические системы, ведущие технологические процессы, включают в себя системы и автоматического контроля, и автоматического управления, и автоматического регулирования в самых различных сочетаниях и объемах. Обобщенная структурная схема комплекса технических средств автоматической системы приведена на рис. 3.14. Здесь технологический процесс сопровождается:

- контролем дискретных параметров (например, «нагреватель включен» или «наполнен седьмой резервуар»), воздействующих на соответствующие датчики (Д), сигналы которых через переходные устройства (ПУ), устройства нормализации сигналов (УНС) и регистры или счетчики поступают на ЭВМ;
- контролем аналоговых параметров (например, температуры, уровня, давления, расхода), воспринимаемых аналоговыми датчиками (Д), сигналы которых также через переходные устройства (ПУ), устройства нормализации сигналов (УНС), коммутатор (К), усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) поступают также на ЭВМ;
- поддержанием отдельных параметров (на схеме — одного) на заданном уровне с помощью регулятора, в котором значение регулируемого параметра с помощью датчика (Д) передается через ПУ на регулирующее устройство (РУ), где сравнивается с сигналом от задатчика (З). Выходной сигнал РУ поступает (через ПУ) на исполнительный механизм (ИМ), который воздействует на рабочие органы (РО) таким образом, чтобы при нарушении равновесия вернуть параметр в исходное состояние;
- выработкой ЭВМ на основе анализа состояния технологического процесса и технологического оборудования дискретных управляющих воздействий (например, «включить нагреватель № 2» или «открыть клапан № 5»), которые через выходные регистры и ПУ поступают на исполнительные механизмы (например, электромагнитное реле или электромагнит) и приводят в действие дискретные РО (например, электронагреватель или пневмоэлектроклапан);
- выработкой ЭВМ на основе анализа состояния технологического процесса и технологического оборудования аналоговых управляющих воздействий (например, «понижить уровень Н2» и «поднять давление Р4»), которые через цифроаналоговый пре-

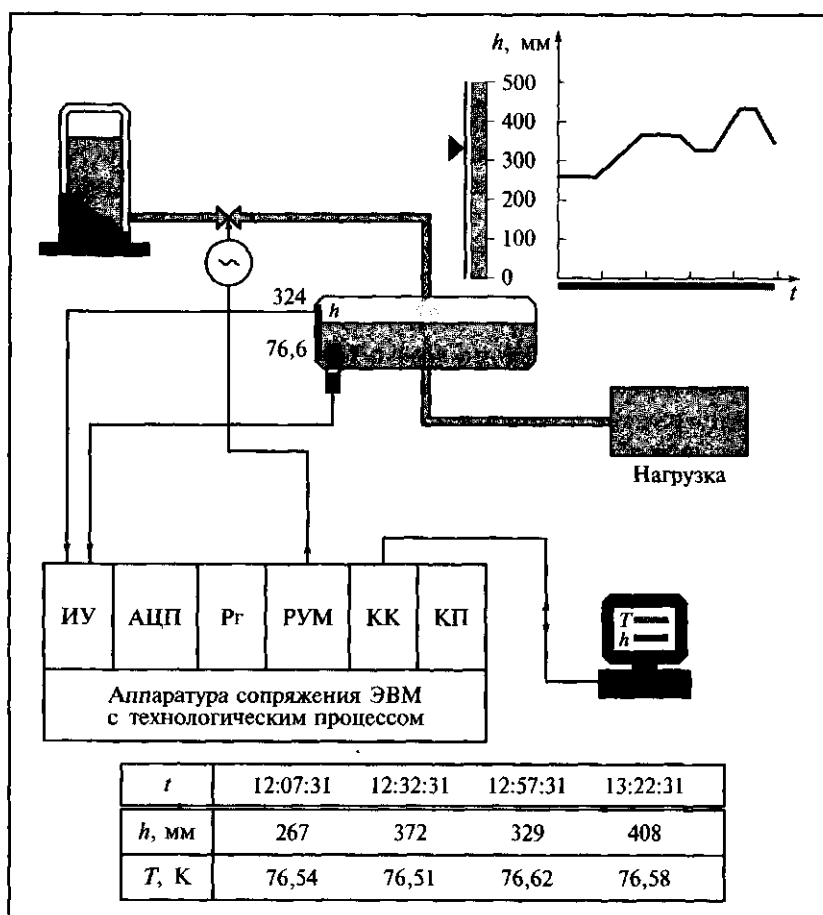


Рис. 3.15. Представление информации о технологическом процессе на дисплее оператора

образователь (ЦАП) и коммутатор поступают на запоминающие устройства (ЗУ) и далее через ПУ управляют работой ИМ (например, «включить электродвигатель ЭД2 против часовой стрелки на 1,2 с» и «переместить шток пневмопривода ПП4 на 0,64 мм), которые, в свою очередь, приводят в действие аналоговые РО (например, вентиль В2 и задвижку З4).

Оператор получает всю необходимую информацию о протекании технологического процесса и состоянии технологического оборудования (рис. 3.15). Она представляется ему в виде таблиц, графиков,

диаграмм и мнемосхем как на экранах дисплеев, так и на бумажных носителях.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Что такое технологический процесс?
2. В чем заключается смысл управления?
3. Приведите примеры управляющих воздействий.
4. Сформулируйте определение сигнала.
5. Какие сигналы и величины называются аналоговыми?
6. Какие сигналы и величины называются дискретными?
7. Сформулируйте определение исполнительного механизма.
8. Что такое датчик?
9. Что понимается под каналом связи?
10. Перечислите типы автоматических систем.
11. Сформулируйте определение системы автоматического контроля.
12. Сформулируйте определение системы автоматического управления.
13. Сформулируйте определение системы автоматического регулирования.
14. Что понимается под технологическим параметром?
15. Что такое номинальные, регламентные и предельные значения технологического параметра?
16. Перечислите задачи, решаемые системой автоматического контроля.
17. Поясните алгоритм работы системы автоматического контроля.
18. Дайте определение технических средств системы автоматического контроля.
19. Перечислите технические средства обработки аналоговых сигналов.
20. Перечислите технические средства обработки дискретных сигналов.
21. Каково назначение перечисленных технических средств?
22. Поясните алгоритм работы системы автоматического управления.
23. Чем отличается алгоритм управления от алгоритма контроля?
24. Назовите технические средства формирования аналоговых воздействий.
25. Назовите технические средства формирования дискретных воздействий.
26. Какова отличительная особенность системы автоматического регулирования по сравнению с системой автоматического управления?

27. Назовите два основных принципа регулирования.
28. В чем суть принципа регулирования по отклонению?
29. В чем суть принципа регулирования по компенсации?
30. Какие задачи решает адаптивная система?
31. Какие задачи решают следящая и программная системы?
32. Что такое устойчивость системы автоматического регулирования?
33. Дайте определение звена в системе автоматического регулирования.
34. Что такое переходная характеристика звена?
35. Назовите пять основных типов звеньев.
36. Охарактеризуйте поведение звеньев в переходном режиме.
37. Поясните обобщенную структурную схему комплекса технических средств автоматической системы.

# ДАТЧИКИ

Мы воспринимаем окружающий мир при помощи органов чувств. Органы зрения, слуха, обоняния преобразуют параметры окружающего мира в сигналы, передаваемые нервной системой головному мозгу — нашему управляющему устройству. Глаза, уши, нос — это наши датчики. Физические явления и процессы, протекающие в них, не всегда нам понятны, но, скорее всего, они преобразуют получаемую извне информацию в электрические сигналы.

Датчики автоматических систем тоже преобразуют технологические параметры в электрические сигналы. Чтобы понять, как они это делают, рассмотрим, как вообще можно получить электрическое напряжение.

Известно, что разность потенциалов (электрическое напряжение) может возникать:

- между концами проводника при его движении в магнитном поле;
- на гранях кристалла кварца при действии на него силы;
- между свободными концами двух соединенных проводников из различных металлов при нагреве точки их контакта;
- между двумя разнородными полупроводниками при освещении зоны их контакта (*p*—*n*-перехода) и т. д.

Эти и подобные им явления лежат в основе работы датчиков различных параметров технологических процессов: скорости, силы, температуры, освещенности и др.

### 4.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

Практически все автоматические системы используют датчики, формирующие на выходе электрические сигналы. Это связано с тем, что:

- электрические сигналы могут быть легко переданы на значительные расстояния, а датчики могут располагаться в любых труднодоступных местах технологического оборудования;
- электрические сигналы могут быть легко усилены в тысячи раз, т. е. в тысячи раз может быть повышена при необходимости чувствительность аппаратуры измерения значений технологических параметров;
- электрические сигналы обладают малой инерционностью, что позволяет следить за быстро изменяющимися во времени параметрами и обеспечивать высокую скорость работы автоматических систем в реальном времени;
- электрические сигналы наиболее удобны для работы с большинством широко распространенных технических средств: усилителями, коммутаторами, электрическими двигателями, электромагнитными реле и другими, в том числе с ЭВМ.

Датчики, преобразующие неэлектрические параметры в электродвижущую силу (ЭДС), электрическое напряжение или ток, называются *генераторными*, или *активными*. Они не требуют для своей работы внешнего источника электрической энергии, так как вырабатывают эту энергию сами, точнее, используют для формирования выходного сигнала энергию устройств или процессов, чьи параметры они преобразуют в сигналы. Это может быть механическая, световая, тепловая или иная энергия, преобразуемая датчиками в электрическую.

В других датчиках изменение неэлектрического параметра, воспринимаемое датчиком, приводит к изменению того или иного электрического параметра самого датчика (его сопротивления, электроемкости, индуктивности и т. д.). Такие датчики называются *параметрическими*, или *пассивными*. Они нуждаются для формирования выходного сигнала во внешнем источнике электрической энергии.

Основными характеристиками датчиков, определяющими их пригодность для тех или иных целей, являются:

- функция преобразования;
- чувствительность;
- погрешность;
- нелинейность;
- инерционность и др.

Любые характеристики применимы только в ограниченном диапазоне воздействий на датчик (например, датчик температуры не

может нормально работать в условиях, при которых он сам едва ли не плавится от жары). Диапазон изменения преобразуемых параметров, в котором для датчика гарантируются значения его характеристик, называется *рабочим диапазоном* датчика.

*Функция преобразования* — это зависимость между значениями выходной величины  $X_{\text{вых}}$  и входной величины  $X_{\text{вх}}$  датчика. Ее представляют либо формулой, либо графиком. Для аналоговых датчиков наиболее удобна пропорциональная зависимость между  $X_{\text{вых}}$  и  $X_{\text{вх}}$ :

$$X_{\text{вых}} = KX_{\text{вх}},$$

где  $K$  — постоянный коэффициент.

График этой зависимости — прямая линия, поэтому такую функцию преобразования называют линейной. У большинства датчиков в широком диапазоне изменения входных параметров функция преобразования нелинейная, поэтому приходится принимать меры для ее линеаризации (т. е. для получения пропорциональной зависимости между  $X_{\text{вых}}$  и  $X_{\text{вх}}$ ) хотя бы в пределах рабочего диапазона, например, изменяя конструкцию датчика. Другой способ работать с нелинейной характеристикой — занести ее в память ЭВМ (тем более, что у современных ЭВМ с памятью проблем нет).

*Чувствительность датчика*  $S$  показывает, как изменяется выходной сигнал  $X_{\text{вых}}$  датчика при изменении входного параметра  $X_{\text{вх}}$  на единицу (например, на сколько ом изменится сопротивление датчика (выходная величина) при изменении температуры (входная величина) на  $1^\circ\text{C}$ ). Чувствительность равна отношению изменения  $\Delta X_{\text{вых}}$  выходной величины к изменению  $\Delta X_{\text{вх}}$  входной величины:

$$S = \Delta X_{\text{вых}} / \Delta X_{\text{вх}}.$$

Например, при изменении температуры на  $10\text{ K}$  у одного датчика сопротивление изменилось на  $100\text{ Ом}$ , а у второго — на  $300\text{ Ом}$ . Какой из двух датчиков обладает большей чувствительностью? Конечно, второй, у которого  $S = 300 : 10 = 30\text{ (Ом/К)}$ .

*Погрешность* — это отклонение реального значения выходной величины от идеального (действительного), которое должно быть на выходе датчика при данном значении входного параметра согласно документации. Различают абсолютную и относительную погрешности.

*Абсолютная погрешность* — это разность между реальным и идеальным значениями; она измеряется в тех же единицах, что и выходная величина. Например, идеальная величина сопротивления датчика в процессе преобразования заданного значения температуры должна быть равна  $100\text{ Ом}$ , а реально его сопротивление при



Таблица 4.1

<i>T</i> , К	4,2	4,3	...	18,2	...	90,1	90,3	...	100,0
<i>R</i> , Ом	585,99994	557,50552	...	49,27075	...	2,87548	2,87191	...	2,21236

этой температуре оказалось 105 Ом. Таким образом, абсолютная погрешность составляет:

$$\delta X = X_{\text{вых. реал}} - X_{\text{вых. идеал}} = 5 \text{ (Ом)}.$$

Однако абсолютная погрешность не может служить мерой точности. Действительно, если мы измеряем температуру около 100 °С с абсолютной погрешностью 1 °С, то ошибка составляет 1 %, что неплохо. Но если с той же абсолютной погрешностью 1 °С мы будем измерять температуру около 5 °С, то ошибка составит уже 20 %. Поэтому вводят понятие *относительной погрешности* — это отношение абсолютной погрешности к идеальному значению выходной величины, %:

$$\gamma X = (\delta X / X_{\text{вых. идеал}}) \cdot 100.$$

Еще более полное представление о точности датчика дает приведенная погрешность, которая представляет собой отношение максимальной абсолютной погрешности к максимальному для рабочего диапазона данного датчика значению выходной величины, %:

$$\gamma X_{\text{прив}} = (\delta X_{\text{max}} / X_{\text{вых max}}) \cdot 100.$$

Значение этой погрешности определяет класс точности датчика, обычно указываемый в его паспорте.

*Нелинейность* — это отклонение функции преобразования датчика от линейной. Если нелинейность велика, то для уменьшения связанной с ней погрешности в ЭВМ, обрабатывающую сигнал датчика, вводят специальную таблицу поправок (градуировочную кривую).

Например, фрагмент индивидуальной характеристики датчика температуры ТСАД2-СР — зависимость между температурой *T* и сопротивлением датчика *R* — приведен в табл. 4.1. Именно с такой точностью данные вносятся в память ЭВМ.

*Инерционность* характеризует способность датчика осуществлять преобразование быстроизменяющихся входных параметров. Если датчик не успевает за изменением преобразуемого параметра, то появляется дополнительная погрешность, называемая динамической.

Она тем выше, чем больше скорость изменения преобразуемого параметра.

Важной характеристикой датчиков в процессе эксплуатации является взаимозаменяемость. Если датчики взаимозаменяемы, то при выходе датчика из строя достаточно заменить его другим датчиком того же типа, больше никаких изменений в системе контроля и управления делать не нужно. В противном случае одновременно с заменой датчика надо, например, заменять градуировочную таблицу в ЭВМ и т. д.

Среди прочих характеристик датчиков следует отметить надежность, технологичность, стабильность, отсутствие гистерезиса (т. е. зависимости выходной величины от направления изменения входного параметра).

Так как датчики — самые первые устройства в цепи преобразования значений параметров в сигналы для вывода оператору или воздействия на оборудование технологического процесса, их часто называют первичными преобразователями.

## **4.2. ДАТЧИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

### **4.2.1. Общие сведения**

Существует огромное количество самых разнообразных датчиков. В них используются различные физические явления и зависимости между разными физическими величинами. Датчики можно объединить в группы (классифицировать) по общим для каждой группы признакам.

Можно, например, рассмотреть отдельно датчики, основанные на электромагнитных, тепловых, оптических и других явлениях, а можно сгруппировать их по виду преобразуемых технологических параметров: перемещение, скорость, сила, температура и др. Поэтому в названии датчиков указывают обычно и входной технологический параметр (например, перемещение), и принцип преобразования (например, изменение индуктивности). Полное название — индуктивный датчик перемещения.

Из-за большого разнообразия типов, конструкций и марок датчиков, применяемых в различных производственных отраслях, рассмотрим только принципы их работы, сгруппировав датчики по виду преобразуемых технологических параметров.

Если рассмотреть любой технологический процесс, то можно выделить в нем такие операции, как перемещение инструментов или

изделий, нагрев, силовое воздействие, создание давления, контроль положения различных объектов, их состояния, подсчет количества и др.

При выполнении этих операций вручную рабочие пользуются различными измерительными инструментами и приборами. Автоматизация технологических процессов требует применения датчиков для контроля и измерения всех влияющих на процесс параметров. Рассмотрим, как датчики преобразуют в электрический сигнал перемещение, скорость, силу, давление, температуру, как они определяют состояние и количество объектов, а также оценим основные характеристики этих датчиков.

#### 4.2.2. Первичные механические преобразователи

Мы рассматриваем датчики, формирующие электрические сигналы, но бывают ситуации, когда применить датчик, непосредственно преобразующий какой-либо неэлектрический параметр в электрический сигнал, невозможно или нецелесообразно. Тогда используют промежуточное устройство, преобразующее этот параметр в другой, тоже неэлектрический, но более удобный для дальнейшего преобразования в электрический сигнал.

**Промежуточные преобразователи линейных перемещений.** Линейные перемещения в диапазоне от долей миллиметра до десятков сантиметров достаточно просто преобразуются в электрические сигналы датчиками перемещения, которые рассмотрены далее. Однако точное преобразование малых перемещений часто ограничено узким рабочим диапазоном или низкой чувствительностью этих датчиков, а при больших перемещениях размеры датчиков тоже оказываются большими.

В то же время существуют простые механические преобразователи линейного перемещения в угловое с высокой чувствительностью и линейной функцией преобразования. Они используются, например, в индикаторах малых перемещений часового типа.

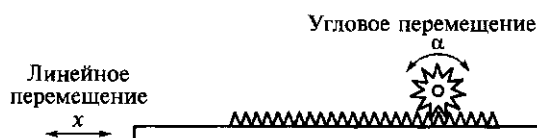


Рис. 4.1. Преобразователь линейного перемещения в угловое

Угловое перемещение (вращение) обладает важным свойством: увеличение угла поворота до любых значений не ведет к увеличению размеров датчика, оно не связано с размерами вращающегося тела. Угол поворота ограничен только конструкцией преобразователя и может быть как очень малым, так и очень большим при неизменных размерах устройства.

В преобразователях линейного перемещения в угловое может использоваться шток с зубчатой линейкой, контактирующий с зубчатым колесом (рис. 4.1). При перемещении штока происходит поворот зубчатого колеса на угол  $\alpha$ , пропорциональный перемещению  $x$ . В индикаторах часового типа используют цепочку соединенных друг с другом зубчатых колес с разным количеством зубьев, благодаря чему даже очень малое перемещение (например, на несколько сотых миллиметра) приводит к повороту последнего в цепочке зубчатого колеса на угол в десятки градусов.

Аналогично работает преобразователь перемещения компьютерной мыши, но в нем вместо штока используется шарик, который при перемещении по поверхности вращает прижатую к нему ось оптического датчика угла поворота.

Такие преобразователи при малых размерах имеют очень широкий рабочий диапазон, в котором сохраняется одна и та же небольшая абсолютная погрешность (менее 0,01 мм в индикаторах часового типа). Это позволяет использовать один преобразователь для точного измерения как очень малых, так и очень больших перемещений.

**Промежуточные преобразователи силы и давления.** Сила и давление способны деформировать тела, т. е. изменять их форму и размеры. Если эта деформация упругая, т. е. тело после прекращения воздействия возвращается к прежней форме и размерам, то такое тело может использоваться в качестве преобразователя силы и давления в деформацию, которая выражается в линейном или угловом перемещении частей тела. Такие преобразователи называются *механическими упругими преобразователями*.

Простейшие преобразователи силы такого типа — пружина или стержень. К этим преобразователям прикладывается сила (рис. 4.2). Пружина под действием силы растягивается

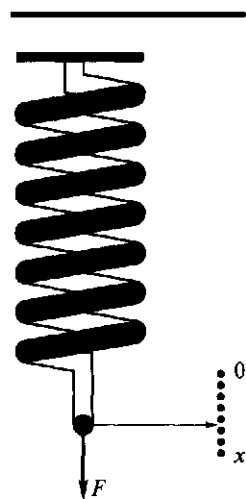


Рис. 4.2. Преобразование силы в перемещение

или сжимается, и перемещение ее незакрепленного конца может быть преобразовано в электрический сигнал рассмотренными далее датчиками перемещения. Стержень тоже растягивается или сжимается, но поскольку его деформация обычно очень мала, удобнее использовать для дальнейшего преобразования датчики не перемещения, а деформации, которые воспринимают очень малые смещения участков поверхности деформированного тела и преобразуют их в сигналы.

Как известно, при ускоренном движении тела оно давит на опору с силой, пропорциональной ускорению, поэтому преобразователи силы могут использоваться и для измерения ускорения.

Преобразователем давления жидкости или газа может служить полый сосуд с расположенной в торце мембраной, которая испытывает давление по всей своей поверхности (рис. 4.3, а). Результатом воздействия будет прогиб мембраны, т. е. деформация ее поверхности, которая затем преобразуется в электрический сигнал датчиком деформации или перемещения.

Деформируемым в зависимости от давления элементом могут быть и гофрированные стенки сосуда (такой сосуд называют сильфоном) (рис. 4.3, б). В этом случае давление приводит к растяжению стенок и линейному перемещению торца сильфона. Чувствительность преобразователя давления можно увеличить заменой сильфона на спиральную трубку, запаянную на конце (рис. 4.3, в). Под действием давления трубка раскручивается вокруг оси спирали. Выходной величиной может быть как линейное, так и угловое перемещение конца трубки.

**Промежуточные преобразователи температуры.** Для измерения температуры нередко используют устройства, преобразующие ее в линейное или угловое перемещение. Для этого применяют плоские или спиральные пружины, изготовленные из биметалла (рис. 4.4).

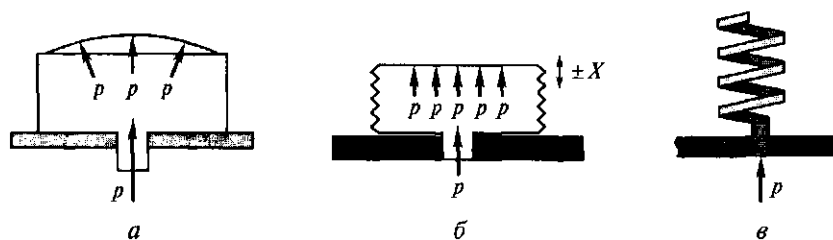


Рис. 4.3. Преобразователи давления:  
а — мембранный; б — сильфонный; в — трубчатый

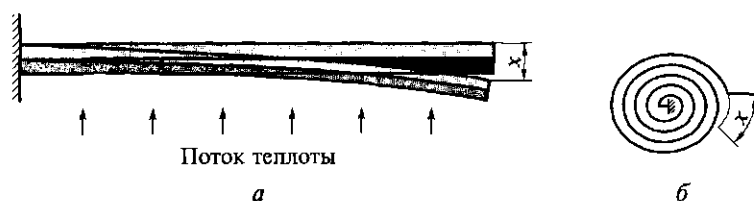


Рис. 4.4. Биметаллические преобразователи:  
 а — плоский; б — спиральный

Биметалл — это двухслойный лист, слои которого состоят из металлов с резко отличающимися температурными коэффициентами расширения. При увеличении температуры один из слоев удлинится больше, чем другой. Поскольку слои спаяны, происходит изгиб пластины или закрутка спирали. Входной параметр этого преобразователя — температура, выходная величина — линейное или угловое перемещение. При этом деформация оказывается пропорциональной изменению температуры, т. е. функция преобразования практически линейная. Такой преобразователь применяется, например, в регуляторе температуры электрического утюга или в качестве указателя температуры в духовке газовой плиты.

Рассмотренные преобразователи силы, давления и температуры просты, имеют малые размеры, погрешность преобразования составляет обычно около 1 %.

### 4.2.3. Датчики линейных и угловых перемещений

**Реостатные датчики.** Основу этих датчиков составляет *реостат* — плоская или свернутая в кольцо пластина из изоляционного материала, на которую намотана с равномерным шагом изолированная проволока (рис. 4.5). Материалом проволоки может быть марганец, константан, нихром или другой сплав с высоким удельным электрическим сопротивлением. На грани пластины изоляция проволоки зачищается, и по металлу скользит щетка в виде нескольких упругих проволочек или пластины с наваренным контактом. Для повышения износостойчивости щетки изготавливаются из серебра, платины и их сплавов, а давление щетки на провод не превышает 0,1 Н.

Входной параметр плоского реостата — линейное перемещение щетки, а кольцевого — ее угловое перемещение. Выходная величина

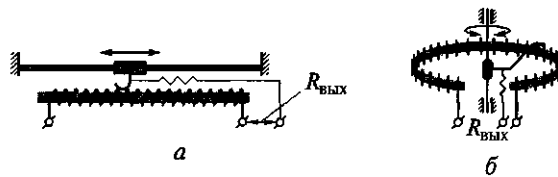


Рис. 4.5. Реостаты:  
а — плоский; б — кольцевой

реостатного датчика — активное сопротивление участка проволоки между щеткой и одним из концов реостата. Хотя изменение сопротивления при движении щетки от витка к витку происходит ступенчато, выходную величину рассматривают как аналоговую, так как величина «ступенек» мала. Для уменьшения «ступенек» и более плавного изменения сопротивления реостат наматывают тонким проводом.

Реостатные датчики используются совместно с поплавком для измерения уровня и объема жидкости (рис. 4.6, а), совместно с механическими упругими преобразователями для измерения силы, давления или момента силы (рис. 4.6, б), их часто используют совместно с исполнительными механизмами для получения информации о перемещении рабочего органа.

**Емкостные датчики.** В основе работы емкостных датчиков лежит зависимость емкости конденсатора  $C$  от его геометрических размеров: площади обкладок  $S$  и расстояния между ними  $d$ :

$$C = \epsilon_a S / d,$$

где  $\epsilon_a$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость материала, находящегося между обкладками.

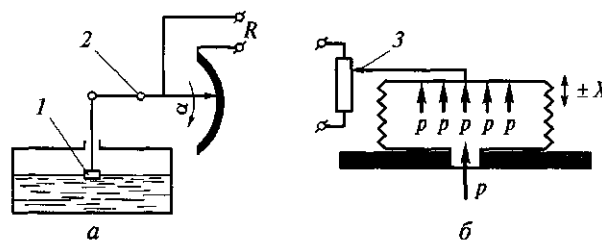


Рис. 4.6. Применение реостатных датчиков:  
а — для измерения уровня жидкости; б — для измерения давления жидкости или газа; 1 — поплавок; 2 — ось вращения указателя; 3 — движок реостата

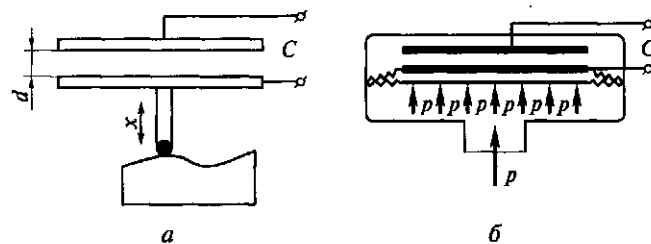


Рис. 4.7. Емкостной датчик малых перемещений:  
 а — схема работы; б — применение для измерения давления

Входной величиной емкостного датчика является линейное или угловое (в зависимости от конструкции) перемещение одной обкладки относительно другой или изменение диэлектрической проницаемости вещества, а выходной — изменение емкости.

Для измерения малых перемещений (до 1 мм) используют датчики с изменением зазора  $d$  между обкладками (рис. 4.7, а). Совместно с мембранным первичным преобразователем давления (рис. 4.7, б) такой датчик может использоваться для преобразования давления в электрический сигнал.

Для измерения больших угловых перемещений используется емкостной датчик с изменяющейся площадью перекрытия обкладок  $S$ , поскольку его емкость линейно зависит от площади, а следовательно, и от угла поворота подвижной пластины (рис. 4.8, а). Такие датчики могут применяться, например, для определения угла поворота заслонки на трубопроводе или руля самолета.

Относительно большие линейные перемещения можно измерять с помощью цилиндрического емкостного датчика (рис. 4.8, б), у кото-

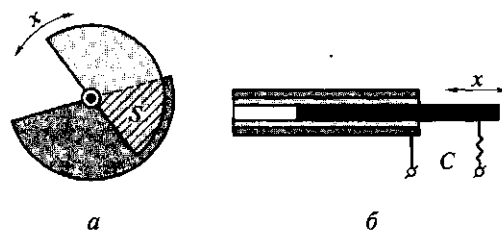


Рис. 4.8. Емкостные датчики с изменяемой площадью перекрытия обкладок (стрелками показано направление перемещения подвижного элемента):

а — плоский; б — цилиндрический



рого площадь перекрытия цилиндрических обкладок, разделенных диэлектриком, прямо пропорциональна продольному перемещению одной из обкладок относительно другой.

Аналогичный датчик, выполненный в виде цилиндра с центральным стержнем, может использоваться для измерения влажности материала (например, волокна или зерна), если испытуемый материал поместить внутрь цилиндра и использовать его в качестве диэлектрика. Наличие влаги в материале существенно изменяет его диэлектрическую проницаемость и соответственно емкость такого конденсатора.

К достоинствам емкостных датчиков относятся простота, малые габаритные размеры и высокая чувствительность (до 500 В/мм, если в качестве выходного сигнала рассматривать напряжение на конденсаторе). Их недостатками являются большое внутреннее сопротивление (а следовательно, малая мощность выходного сигнала), зависимость от температуры и необходимость питания от источника переменного напряжения высокой частоты.

Эти недостатки устранены в современных серийных емкостных датчиках. Они имеют вид законченных приборов с встроенными усилителями, преобразователями напряжения и пр. Датчики питаются от источников постоянного напряжения, их выходная величина — постоянное напряжение или ток.

Емкостные датчики применяются для измерения перемещений, толщины лент и покрытий, влажности материалов.

**Электромагнитные датчики.** В основу работы электромагнитных датчиков положена зависимость характеристик магнитной цепи от механического воздействия на элементы, образующие эту цепь.

Электромагнитные датчики перемещения состоят из сердечника — магнитопровода, выполненного из стальных или пермалловых пластин, феррита или другого ферромагнитного материала, и одной или нескольких обмоток. Магнитопровод имеет подвижный элемент, перемещение которого является входной величиной преобразователя. Различают два типа таких датчиков: индуктивные и трансформаторные.

Принцип работы *индуктивных датчиков* поясняет рис. 4.9. Перемещение подвижного элемента — якоря — относительно неподвижной части сердечника приводит к изменению ширины воздушного зазора в магнитопроводе. Это, в свою очередь, вызывает изменение индуктивности обмотки датчика, которая является выходной величиной (поэтому такое название — «индуктивный датчик перемещения»). Штриховыми линиями на рис. 4.9 показан изменяющийся при перемещении якоря магнитный поток.

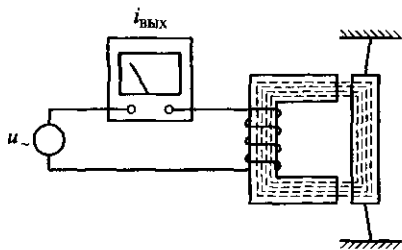


Рис. 4.9. Схема работы индуктивного датчика с изменяющейся шириной зазора

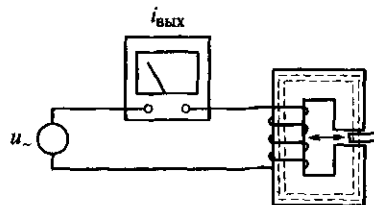


Рис. 4.10. Схема работы индуктивного датчика с изменяющейся площадью зазора

Функция преобразования — линейная в области малых зазоров, поэтому такие датчики применяются для измерения перемещений от 0,01 мм до нескольких миллиметров.

Для измерения перемещений до 15...20 мм используют индуктивные датчики с изменяющейся площадью зазора (рис. 4.10). Входным параметром является положение подвижного элемента, вводимого в зазор магнитопровода.

Для измерения перемещений до 100 мм применяют индуктивные датчики соленоидного типа (рис. 4.11). В них индуктивность обмотки прямо пропорциональна длине  $x$  введенной в соленоид части подвижного сердечника.

Индуктивные датчики питаются от источника переменного напряжения. Поскольку их индуктивность отлична от нуля при любом, в том числе начальном, положении якоря, они создают большой выходной сигнал даже при нулевом значении входного параметра.

Этот недостаток можно существенно уменьшить применением дифференциальных датчиков (рис. 4.12), в которых используются два неподвижных сердечника с обмотками, включенными встречно. Якорь расположен между сердечниками на одинаковом расстоянии от них, поэтому в исходном состоянии магнитные потоки в сердечни-

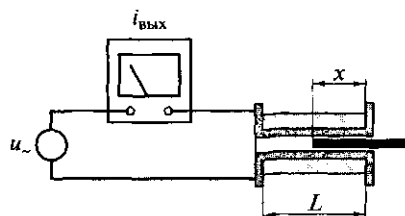


Рис. 4.11. Схема работы индуктивного датчика соленоидного типа

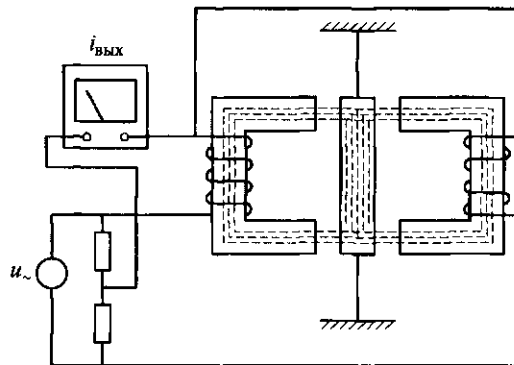


Рис. 4.12. Схема работы дифференциального индуктивного датчика

ках одинаковы, следовательно, одинаковы индуктивности обмоток и напряжения на них, а разность этих напряжений равна нулю.

Когда якорь смещается в сторону одного из сердечников, магнитный поток в этом сердечнике увеличивается, а в другом — уменьшается. Индуктивности обмоток и напряжения на них становятся разными, что приводит к появлению выходного сигнала.

Очень большие перемещения (например, перемещение суппорта металлорежущего станка) можно измерить с помощью индуктивного датчика с зубчатым сердечником (рис. 4.13). При движении датчика вдоль зубчатой линейки, закрепленной на станине станка, индуктивность его обмотки периодически изменяется. Когда торцы сердечника датчика находятся над зубцами линейки, индуктивность обмотки максимальна, а при смещении сердечника в область между зубцами индуктивность уменьшается. Соответственно ток в цепи меняется от минимального до максимального, образуя перепад

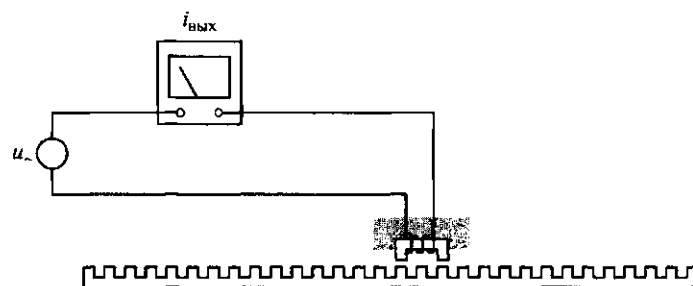
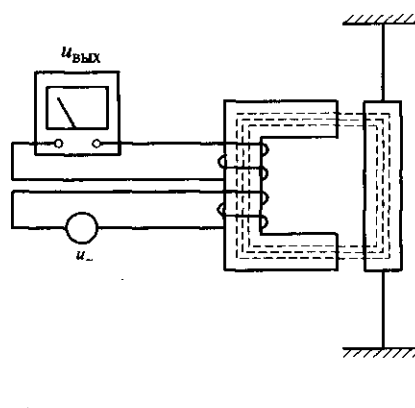


Рис. 4.13. Схема работы индуктивного датчика с зубчатым сердечником

Рис. 4.14. Схема работы трансформаторного датчика



(импульс). Один импульс соответствует перемещению датчика на один шаг зубьев.

Выходная величина такого датчика — количество перепадов тока (импульсов) в цепи обмотки; точность измерения зависит от шага зубьев.

Все индуктивные датчики — параметрические, питаются от источников переменного напряжения или встроенных преобразователей напряжения. Достоинствами индуктивных датчиков являются большое значение выходного сигнала, высокая чувствительность, надежность и простота; их погрешность — около 1 %.

В трансформаторных датчиках используется явление изменения взаимной индуктивности обмоток при перемещении подвижного элемента магнитопровода (рис. 4.14) относительно его неподвижной части. Одна из обмоток (первичная) питается от источника переменного напряжения, со вторичной обмотки снимается выходной сигнал.

По внешнему виду датчик похож на обычный трансформатор, используемый для получения переменного напряжения нужной величины. Однако наличие воздушного зазора в магнитопроводе приводит к тому, что магнитный поток в нем, как и в индуктивном датчике, зависит от величины зазора. Чем меньше зазор, тем больше магнитный поток и тем большая электродвижущая сила возникает во вторичной обмотке, и наоборот. Таким образом, входной величиной трансформаторного датчика является перемещение подвижного элемента магнитопровода, а выходной — напряжение на выходе вторичной обмотки. Область измеряемых перемещений — от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров.

Для измерения перемещений до 100 мм и более используются трансформаторные датчики с распределенными магнитными параметрами (рис. 4.15). Вторичная обмотка у них подвижная и может скользить по магнитопроводу, магнитный поток в котором показан штриховыми линиями. В пространстве вокруг магнитопровода, как обычно, существует магнитное поле, которое пронизывает подвижную обмотку. В левом положении обмотки магнитный поток, проходящий через нее, максимален, как и возникающая в ней ЭДС

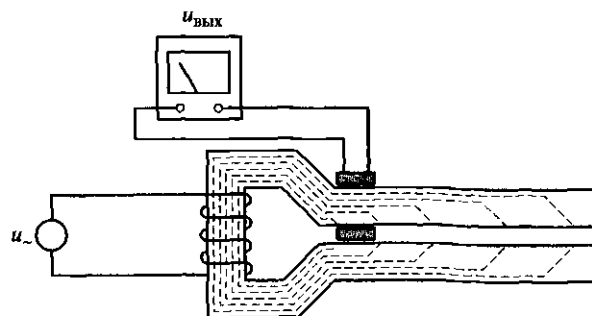


Рис. 4.15. Схема работы трансформаторного датчика с распределенными магнитными параметрами

(выходной сигнал датчика). По мере смещения вправо магнитный поток, проходящий сквозь обмотку, уменьшается и в крайнем правом положении он минимален, соответственно минимален и выходной сигнал.

Трансформаторные датчики по конструкции и характеристикам очень похожи на индуктивные. Они тоже могут быть дифференциальными (рис. 4.16), что также улучшает их характеристики. Но в отличие от индуктивных датчиков трансформаторные датчики можно отнести к датчикам генераторного типа. Хотя они и требуют для своей работы наличия источника напряжения, но сигнал непосредственно на выходе датчика активный — электродвижущая

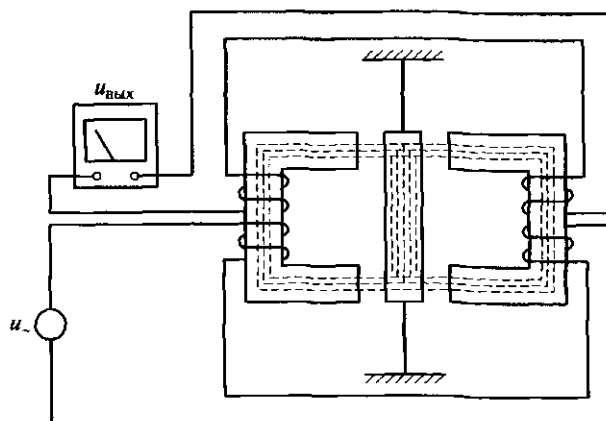


Рис. 4.16. Схема работы дифференциального трансформаторного датчика

сила, которая может быть легко измерена. Это привело к широкому распространению трансформаторных датчиков перемещения, особенно дифференциальных, в автоматических системах контроля и управления.

Трансформаторные датчики, как и индуктивные, надежны, просты, имеют высокую чувствительность и большой выходной сигнал.

**Оптические датчики.** Основными элементами оптических датчиков являются (рис. 4.17) источник излучения, оптический канал и приемник излучения.

Входным параметром оптического датчика, как правило, является перемещение объекта, воздействующее на оптический канал (перекрывающее поток света от источника к приемнику); выходным параметром — электрический сигнал (электродвижущая сила или ток), формируемый приемником излучения.

В качестве источников излучения используют как лампы накаливания, так и *светодиоды* — полупроводниковые приборы, излучающие свет при прохождении электрического тока, а также полупроводниковые лазеры. Светодиоды могут создавать и невидимое инфракрасное излучение, что позволяет избегать засветки приемника излучения, чувствительного только к инфракрасному излучению, от посторонних источников, в том числе от дневного света.

Оптическим каналом, как правило, является обычная воздушная среда, хотя для передачи оптических сигналов на большие расстояния используют оптоволоконные линии связи.

Приемниками излучения служат вакуумные фотоэлементы или полупроводниковые приборы: фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы.

В *фотоэлементе* свет выбивает электроны из металлического внутреннего покрытия колбы и под действием электрического поля электроны движутся в вакууме к аноду, создавая электрический ток.

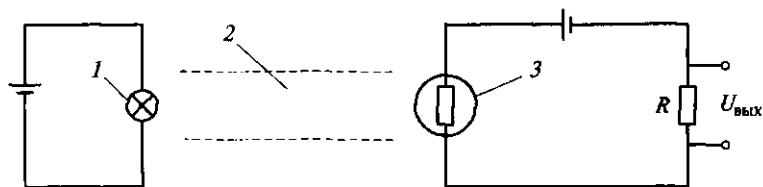


Рис. 4.17. Схема работы оптического датчика:

1 — источник излучения; 2 — оптический канал, 3 — приемник излучения

*Фоторезистор* — полупроводниковый элемент, в котором действие света вызывает падение сопротивления полупроводника, в результате чего ток, проходящий через него, растет.

В *фотодиоде* энергия света преобразуется в электрическую энергию благодаря ионизации полупроводника фотонами и возникновению пар электрон—дырка, накопление которых в зоне  $p-n$ -перехода приводит к появлению фотоЭДС. В результате в цепи освещенного фотодиода появляется ток, что используется, в частности, для создания солнечных батарей.

В *фототранзисторе* благодаря наличию второго  $p-n$ -перехода происходит значительное увеличение тока в выходной цепи по сравнению с фотодиодом, т. е. чувствительность фототранзистора к свету существенно выше.

Оптические датчики могут преобразовывать перемещение в электрический сигнал как в аналоговом, так и в дискретном режиме. В первом случае оптический канал имеет ширину до нескольких миллиметров и перемещение непрозрачного объекта в зоне канала приводит к его частичному, большему или меньшему, перекрытию. Соответственно изменению освещенности приемника излучения меняется и выходной сигнал. Метод перекрытия светового потока используется, например, при воспроизведении звукового сопровождения фильма, записанного на киноплёнку. Изменение освещенности фотоприемника применяется также для контроля прозрачности газа или жидкости, помещенных на пути светового потока.

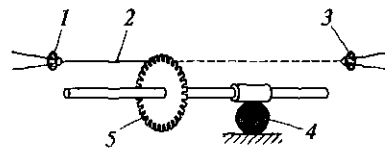
Дискретный режим используется, например, в оптическом датчике компьютерной мыши, принцип работы которого поясняет рис. 4.18. Угловое перемещение зубчатого колеса приводит к периодическому перекрытию оптического канала каждый раз, когда колесо поворачивается на угол, соответствующий шагу зубьев. В результате изменения освещенности приемника излучения изменяется и значение тока или напряжения на его выходе. Выходная величина датчика — количество импульсов в цепи приемника излучения, причем чем больше перемещение, тем больше количество импульсов и меньше погрешность преобразования.

Этот же принцип может использоваться и для измерения линейных перемещений; достаточно обеспечить движение датчика вдоль зубчатой линейки подобно тому, как это делается в индуктивном датчике с зубчатым сердечником (см. рис. 4.13).

Оптические датчики просты, надежны, долговечны, имеют малые массу и размеры, малую инерционность. Их недостатком при работе в аналоговом режиме является влияние на результат преобразова-

Рис. 4.18. Схема работы датчика компьютерной мыши:

1 — светодиод; 2 — оптический канал; 3 — фотодиод; 4 — шарик; 5 — прерыватель потока



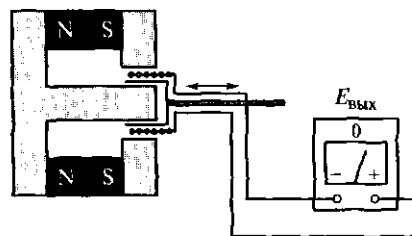
ния температуры и состояния окружающей среды (запыленности, внешней засветки и т. д.).

#### 4.2.4. Датчики скорости

Для работы всех рассмотренных ранее электромагнитных датчиков требуется источник питания. В отличие от них индукционные датчики сами способны генерировать электрическую энергию, т. е. они относятся к активным (генераторным) датчикам, преобразующим механическую энергию внешнего воздействия на них в электрическую энергию. Входной параметр индукционных датчиков — скорость линейного или углового перемещения подвижной катушки (ротора), в которой и появляется выходной сигнал в виде ЭДС.

В индукционных датчиках используется явление электромагнитной индукции, т. е. возникновение ЭДС в электрической цепи при изменении магнитного потока, пронизывающего эту цепь. Величина возникающей ЭДС зависит от скорости изменения магнитного потока, проходящего сквозь обмотку датчика, поэтому индукционные датчики применяются для измерения скорости линейного или углового перемещения (например, в тахометрах или спидометрах автомобилей). Другим примером индукционного датчика является магнитозлектрический микрофон, преобразующий звуковые колебания мембраны, связанной с перемещающейся в магнитном поле катушкой, в электрические сигналы.

Рис. 4.19. Схема работы индукционного датчика (стрелкой показано направление перемещения катушки)





Принцип работы датчика скорости перемещения подвижной катушки, позволяющего изучать характеристики вибрационных процессов, поясняет рис. 4.19.

#### 4.2.5. Датчики деформации

В подразд. 4.2.2 были рассмотрены преобразователи силы и давления в деформацию. Измерив деформацию, можно определить величину вызвавшего ее исходного параметра. Деформация всегда связана с изменением размеров тела, поэтому ее измерение сводится к измерению перемещения одних участков поверхности тела относительно других. Если деформация значительна, то можно применить один из рассмотренных ранее датчиков перемещения, например, реостатный, емкостной, индуктивный или оптический. Проблемы возникают, когда деформация настолько мала, что определить ее датчиками перемещения невозможно. В то же время эта деформация может быть вызвана приложением достаточно большой силы, которую другими способами измерить невозможно. В таком случае используют тензометрические датчики на основе тензорезисторов.

Работа этих датчиков основана на тензоэффекте, т. е. изменении активного электрического сопротивления проводника при его механической деформации. Как известно, сопротивление металлического проводника пропорционально его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения. При растяжении проводника его длина увеличивается, а площадь сечения уменьшается, и такое двойное воздействие приводит к заметному изменению его сопротивления.

Обычно тензорезисторы изготавливаются в виде зигзагообразно уложенной и наклеенной на тонкую бумагу проволоки (рис. 4.20) диаметром 0,02...0,05 мм или фольги, покрытой сверху защитным лаком.

Для удобства дальнейшей обработки сигнала используют проволоку из сплавов с высоким удельным сопротивлением — манганина, константана или нихрома. Проводящий слой может быть также изготовлен напылением на подложку в вакууме (напыляются не только металлы, но и полупроводники).

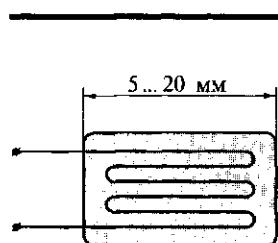


Рис. 4.20. Тензорезистор

Тензорезистор наклеивается на деформирующийся элемент. Выходная величина тензорезистора — изменение сопротивления — пропорциональна деформации элемента. Сопротивление преобразуется в напряжение соответствующим устройством нормализации сигналов.

Тензометрические датчики просты, недороги, имеют линейную функцию преобразования, малые габаритные размеры и массу. Их погрешность составляет от 0,1 до 5 %.

Недостатками тензодатчиков являются малая чувствительность и небольшой диапазон измеряемых деформаций, слабый выходной сигнал, а также зависимость выходной величины от температуры. Температура не только влияет на сопротивление тензорезистора, но и вызывает дополнительную деформацию исследуемого элемента, поэтому приходится проводить предварительную калибровку уже наклеенного тензорезистора (тензорезистор переклеиванию не подлежит, т. е. это изделие разового применения).

Чувствительность полупроводниковых тензометрических датчиков примерно в 100 раз выше, чем проволочных, но и влияние температуры на них гораздо сильнее.

#### 4.2.6. Датчики силы

Для измерения силы можно использовать преобразователи, описанные в подразд. 4.2.2, совместно с датчиками перемещения или деформации. Но существуют датчики, непосредственно преобразующие силу в электрический сигнал. Рассмотрим два вида таких датчиков: магнитоупругие и пьезоэлектрические.

В основе работы *магнитоупругих* датчиков лежит изменение магнитной проницаемости ферромагнитных тел под действием приложенной силы. Увеличение силы, приложенной к магнитопроводу (рис. 4.21), ведет к уменьшению магнитной проницаемости материала сердечника и соответственно к уменьшению индуктивности обмотки. В результате изменяется ток в обмотке, который и является выходной величиной датчика. К сожалению, эти изменения линейны лишь в небольшом диапазоне изменения силы.

В отличие от индуктивных и трансформаторных преобразователей, магнитоупругие датчики имеют сплошной сердечник и могут

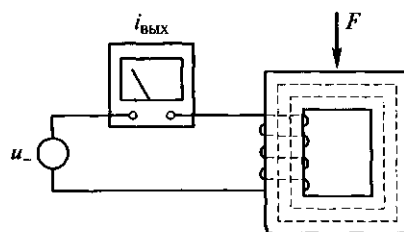


Рис. 4.21. Схема работы магнитоупругого датчика силы

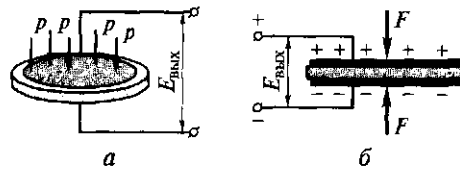


Рис. 4.22. Схема работы пьезоэлектрического датчика силы:

*a* — воздействие давления на кристалл; *б* — возникновение разности потенциалов при сжатии кристалла

быть как дроссельного (с одной обмоткой), так и трансформаторного типов. В датчике трансформаторного типа изменяется коэффициент трансформации, за счет чего изменяется выходное напряжение на вторичной обмотке.

Чувствительность магнитоупругих датчиков составляет около 1 мВ/Н. Они могут применяться для измерения как постоянных, так и изменяющихся сил.

В пьезоэлектрических датчиках используется пьезоэффект, который заключается в возникновении разноименных электрических зарядов на противоположных гранях некоторых кристаллов (кварц) или керамики (титанат бария) под действием силы (рис. 4.22). Разность потенциалов между гранями является выходной величиной такого датчика.

К сожалению, при неизменной приложенной силе разность потенциалов быстро убывает, так как заряды «стекают» с кристалла через окружающую среду. Поэтому пьезодатчики используют только для измерения изменяющихся сил или ускорений, например при исследовании вибраций. Широко известный пример применения этих датчиков — звукозаписывающие устройства граммофонов и пьезоэлектрические микрофоны.

Простота и надежность пьезодатчиков обеспечили удобство их применения в автоматических системах.

#### 4.2.7. Датчики температуры

В автоматических системах нашли широкое применение датчики двух видов: на основе термоэлектрических преобразователей (термопар) и терморезисторов.

*Термопара* — это электрическая цепь, составленная из двух разнородных проводников. Место их соединения называют горячим спаем. Если температура спаев отличается от температуры свободных выво-

дов проводников, то между выводами возникает электродвижущая сила, пропорциональная разности температур между ними и спаем. Таким образом, термопара — это активный (генераторный) датчик, способный преобразовывать тепловую энергию непосредственно в электрическую — термоЭДС. Выводы термопары помещают в среду с постоянной, в частности комнатной, температурой и соединяют с измерительным устройством соединительной линией (рис. 4.23), к материалу которой при точных измерениях предъявляются особые требования.

Величина термоЭДС зависит от материала проводников, образующих термопару, который, в свою очередь, определяется диапазоном измеряемых температур. Например:

- медь — константан — до 300 °С;
- медь — никель — до 600 °С;
- хромель — копель — до 800 °С;
- хромель — алюмель — до 1 300 °С;
- платина — платинородий — до 1 600 °С.

В зависимости от материалов термопары величина термоЭДС (выходная величина датчика) составляет от десятков микровольт до десятков милливольт.

Поскольку горячие среды обычно агрессивны, термопару помещают в герметичный стальной или фарфоровый корпус, от которого ее электрически изолируют, например асбестом или фарфором (рис. 4.24). Провода термопары должны быть длинными, чтобы их свободные концы можно было поместить в среду с температурой, при которой велась градуировка термопары. Несмотря на малые габаритные размеры самого спая в целом термопара имеет диаметр рабочей части в пределах нескольких миллиметров (от 1 до 10) и длину от 100 до 1 000 мм и более. Бескорпусные термопары могут

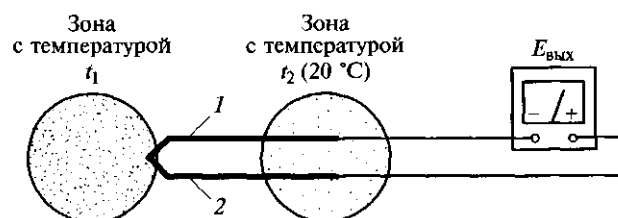


Рис. 4.23. Цепь с термопарой:  
1, 2 — разнородные проводники

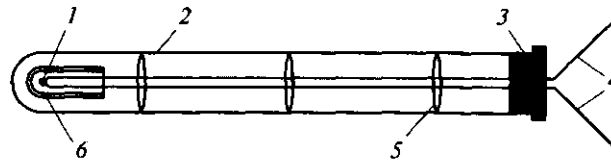


Рис. 4.24. Устройство датчика на основе термопары:

1 — спай; 2 — защитная трубка; 3 — пробка; 4 — выводы; 5 — изолятор; 6 — фарфоровый наконечник

использоваться для точечного определения температуры, так как размер самого спаия менее 1 мм.

Термопары — единственное средство для измерения очень высоких температур в диапазоне 1500...2500 °С.

*Терморезистор* — это спираль из проволоки или стержень из полупроводника, помещенные в защитный корпус, подобный корпусу термопары. Высокая теплопроводность корпуса обеспечивает передачу теплоты к терморезистору. Как известно, при изменении температуры сопротивление и проводников, и полупроводников меняется, но по-разному: с ростом температуры сопротивление проводников практически линейно увеличивается, а полупроводников — нелинейно уменьшается.

Среди металлических терморезисторов наибольшее распространение получили медные и платиновые. Терморезисторы (термометры сопротивления ТСМ) медные самые дешевые; их используют в температурном диапазоне -50...+180 °С. Терморезисторы платиновые (ТСП) дорогие, но они работают в более широком диапазоне (-200...+650 °С) и являются наиболее точными средствами измерения температуры (погрешность — от 0,001 °С).

Выходная величина терморезисторов — сопротивление. Из-за малого собственного сопротивления металлических терморезисторов (десятки ом) на результат преобразования сильно влияет сопротивление линии связи, что вынуждает к принятию специальных мер, в частности, использованию трех- или четырехпроводных линий связи терморезистора с измерительной цепью устройства нормализации сигналов (рис. 4.25). В такой линии относительно большой ток питания терморезистора  $I$  протекает по одной паре проводов, создавая в ней заметное падение напряжения, зато информационный сигнал в виде напряжения на терморезисторе  $U$  передается в измерительную цепь практически без потерь, так как ток в этой паре проводников из-за высокого входного сопротивления измерительной цепи очень мал.



Рис. 4.25. Подключение датчика четырехпроводной линией

Большая инерционность терморезисторов (до нескольких минут) не позволяет применять их для измерения быстрых перепадов температуры.

Полупроводниковые терморезисторы обладают более высокой чувствительностью, меньшими габаритными размерами и позволяют измерять температуры, близкие к абсолютному нулю (от  $-270^{\circ}\text{C}$ ). Их основной недостаток — существенная нелинейность функции преобразования при очень большом диапазоне изменения собственного сопротивления (см. табл. 4.1), что осложняет построение измерительных цепей. Так, сопротивление терморезистора ТПК-620 при температуре  $-269^{\circ}\text{C}$  составляет около  $10\,000\ \text{Ом}$ , а при  $+20^{\circ}\text{C}$  — всего  $0,002\ \text{Ом}$ .

Большинство полупроводниковых терморезисторов имеют рабочий диапазон  $-50 \dots +300^{\circ}\text{C}$ , в котором их сопротивление изменяется от сотен килоом до сотен ом. Конструктивно они могут быть похожи на обычные резисторы либо могут быть заключены в металлический или стеклянный корпус.

#### 4.2.8. Датчики дискретных параметров

К основным дискретным параметрам, преобразуемым датчиками в электрические сигналы, можно отнести состояние объекта («включен — выключен», «открыт — закрыт» и т. д.) и количество объектов. Частным случаем параметра «состояние» можно считать параметр «код» (операции, позиции и т. д.), который, как и состояние, определяется по некоторому признаку или набору признаков.

Как уже говорилось ранее, любой аналоговый (т. е. непрерывный) параметр может быть дискретизирован, т. е. представлен набором значений, отличающихся одно от другого на определенную величину. Предположим, что суппорт обрабатывающего станка может иметь фиксированные значения угла поворота  $0, 10, 20^{\circ}$  и т. д. Угол поворота — величина аналоговая, но если пронумеровать положения суппорта, то мы будем иметь дело с дискретными величинами —

кодами позиций: 1, 2, 3 и т. д. Для получения информации о том, на какой угол повернут суппорт в данный момент, можно использовать датчик углового перемещения, но если на суппорте есть указатель, по которому можно определить код позиции суппорта, то проще использовать датчик состояния.

Разница между датчиками состояния и количества заключается в следующем. Датчик *состояния* формирует электрический сигнал, однозначно соответствующий одному из двух или нескольких признаков состояния объекта. Например, двигатель включен — на выходе датчика есть сигнал; двигатель выключен — на выходе датчика сигнала нет. И наличие, и отсутствие сигнала содержат информацию о состоянии объекта.

Датчик *количества* формирует сигнал при наличии единственного признака (например, при наличии изделия на конвейере), после чего он возвращается в исходное состояние. При каждом очередном появлении этого признака формируется новый сигнал, т. е. именно в наличии этого сигнала заключается полезная информация.

Сигналы с датчика количества поступают на устройство обработки дискретных сигналов — счетчик, который подсчитывает количество поступивших сигналов, а значит, количество объектов, с которыми связан датчик. Сигналы с датчика состояния поступают на другое устройство — регистр, по которому оператор или управляющее устройство судят о состоянии объекта, с которым связан датчик.

Существуют датчики, которые при аналоговой входной величине формируют дискретный выходной сигнал. Простейший датчик такого типа — *контактный* (рис. 4.26). Его входной параметр — перемещение; дискретная выходная величина — сопротивление электрической цепи, которое может быть или равным нулю (контакты замкнуты), или бесконечно большим (контакты разомкнуты). Дискретность входного параметра означает, что датчик воспринимает только два значения перемещения движущегося штока относительно его начального положения: либо перемещение меньше определенного значения и контакт разомкнут, либо больше и контакт замкнут. Такой датчик может использоваться, например, как концевой выключатель цепи управления движущимся элементом, достигшим крайнего положения, или для контроля предельно допустимого размера деталей на конвейере. Погрешность его может быть очень маленькой — около 1 мкм.

Широко используются для преобразования дискретных сигналов *оптические* датчики. В подразд. 4.2.3 была рассмотрена работа оптического датчика как преобразователя аналоговой величины (углового перемещения), работающего в дискретном режиме. Но

он может использоваться также и как датчик состояния, и как датчик количества.

В первом случае объект, состояние которого контролируется, должен быть снабжен непрозрачным «флажком», который при одном состоянии объекта перекрывает поток света от источника к приемнику излучения, а при другом его состоянии пропускает этот поток. Соответственно в цепи приемника излучения либо нет тока, либо он есть. Если возможны несколько состояний (положений) объекта, то при различных состояниях флажок может перекрывать поток света в разной степени (например, на 20 %, 40 % и т. д.). Соответственно в цепи приемника ток принимает дискретные значения. Роль флажка может выполнять и сам контролируемый объект.

В режиме датчика количества источник и приемник излучения располагаются так, что каждый очередной объект, подлежащий счету, перекрывает оптический канал и очередной сигнал с приемника излучения передается на счетчик.

Оптические датчики удобны тем, что в них отсутствует механический контакт с контролируемым объектом. Они широко используются не только для измерения и контроля технологических параметров, но и для защиты обслуживающего персонала от попадания в опасную зону. В такой ситуации сигнал с датчика может не только предупредить персонал об опасности, но при необходимости автоматически отключить оборудование во избежание травмирования людей.

Комбинация дискретного контактного датчика с первичными механическими преобразователями позволяет создавать дискретные датчики аналоговых параметров, называемые *релейными*. Контактный датчик размещается рядом с механическим преобразователем, выходной величиной которого является перемещение (например, пружинным преобразователем силы, сильфонным преобразователем давления или биметаллическим — температуры). По достижении заданного значения параметра перемещающийся элемент замыкает контакты датчика, формируя выходной сигнал. При изменении параметра в обратном направлении контакты снова размыкаются, причем обычно имеется небольшая разница в значениях параметра, соответствующего замыканию и размыканию контактов (гистерезис).

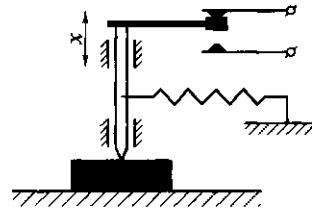


Рис. 4.26. Контактный датчик перемещения



## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Дайте определение датчика.
2. Почему именно в электрический сигнал датчик преобразует технологический параметр?
3. Какие датчики называются активными? Назовите их.
4. Назовите основные выходные параметры пассивного датчика.
5. Перечислите основные характеристики датчиков.
6. Перечислите виды датчиков перемещения. Что является их входной и выходной величиной?
7. Назовите основные датчики деформации, силы. Что является их входной и выходной величиной?
8. Назовите основные датчики температуры. Что является их входной и выходной величиной?
9. Назовите основные датчики дискретных параметров. Какие принципы положены в основу их работы?

# УСТРОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Если человек сильно утомлен, то может не заметить, например, идущего ему навстречу приятеля или не услышать с первого раза звонок в дверь. Но ведь его датчики — глаза и уши — получили информацию и преобразовали ее в сигналы, поступившие в нервную систему. Почему же мозг не отреагировал на эти сигналы? Возможно, потому, что они оказались слишком слабыми — из-за переутомления ваша нервная система не обеспечила необходимое усиление этих сигналов или не смогла выделить их на фоне других поступивших сигналов (помех).

В технических системах тоже возможны ситуации, когда сигналы, поступающие от датчиков, слишком слабые или сопровождаются помехами, поэтому в них большое внимание уделяют устройствам преобразования сигналов.

Устройства преобразования сигналов обеспечивают:

- передачу информационных сигналов от датчиков к аппаратуре обработки сигналов и управляющих сигналов к исполнительным механизмам;
- предварительную обработку (нормализацию) сигналов датчиков;
- усиление сигналов;
- коммутирование сигналов;
- преобразование аналоговой величины в дискретную, и наоборот;
- подсчет событий;
- хранение информации;
- формирование управляющих сигналов для исполнительных механизмов.

## 5.1. ПЕРЕХОДНЫЕ УСТРОЙСТВА

Современные системы управления технологическими процессами включают в себя сотни датчиков и исполнительных механизмов. Каждый из них надо подключить к аппаратуре управления, расположенной во многих случаях на большом удалении от технологического оборудования. Прокладывать от каждого датчика отдельный кабель на такое расстояние дорого и громоздко, гораздо дешевле и компактнее использовать многожильные кабели. Но ведь для подключения одного датчика достаточно всего 2...4 провода. Компромиссом в этой ситуации является разделение соединительных линий на участки, на каждом из которых используется оптимальный вид кабеля, а стыковка участков обеспечивается соответствующими соединительными устройствами — разъемами и клеммными колодками.

Датчики, расположенные на оборудовании близко друг от друга, объединяются в группы, и хотя от каждого датчика идет 2- или 4-жильный кабель, от всей группы сигналы передаются уже по многожильным (до нескольких десятков жил) кабелям. Стыковка кабелей производится с помощью клеммных колодок (рис. 5.1). Аналогично подключаются и исполнительные механизмы.

Кабели, провода, разъемы и клеммные колодки составляют группу переходных устройств.

Выходная цепь датчика заканчивается обычно 2- или 4-контактным разъемом. Ответная часть разъема соединяется с клеммной колодкой, располагаемой непосредственно на технологическом оборудовании или вблизи него. Клеммные колодки, содержащие

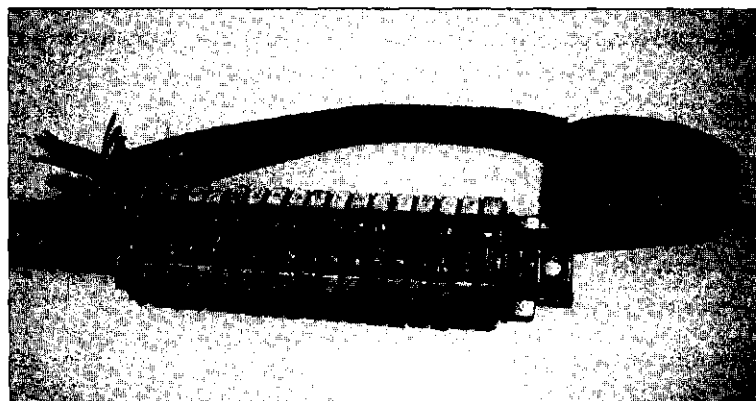


Рис. 5.1. Клеммная колодка

набор клемм, позволяют подключать соединительные провода, как правило, под винт. Концы проводов должны быть облужены. В качестве соединительных проводов для датчиков используются 2- или 4-жильные кабели управления соответствующего сечения (обычно 0,35 или 0,50 мм<sup>2</sup>). Для подключения исполнительных механизмов используют кабели, имеющие от 4 до 10 жил, поскольку по ним не только передаются сигналы управления, но и принимаются сигналы с датчиков состояния ИМ.

Ко второй стороне клеммных колодок подключаются информационные (передающие сигналы от датчиков) и управляющие (передающие управляющие сигналы к ИМ) кабели. Это многожильные кабели, соединяющие технологическое оборудование с аппаратурой управления, которая обычно размещается в непосредственной близости от ЭВМ и на значительном расстоянии от технологического оборудования (до нескольких километров).

На пути от технологического оборудования до аппаратуры управления сигналы претерпевают различные изменения, вызываемые воздействием внешних электрических и магнитных полей. Если эти воздействия сильны, то полезная информация искажается и приходит к аппаратуре управления с ошибками. Для устранения или уменьшения ошибок принимают определенные меры. Это, в первую очередь, правильный выбор типа кабелей и выбор способа их прокладки.

В качестве информационных и управляющих кабелей основное применение нашли кабели марки КУПВ и КУПР — кабели управления в поливинилхлоридной и резиновой изоляции. Сечение жил кабелей 0,35; 0,50; 0,75 и 1,00 мм<sup>2</sup>; количество изолированных многопроволочных медных жил — от 4 до 37. Промышленностью выпускаются кабели с общим экраном из переплетенных медных проводов или алюминиевой фольги, с отдельными экранированными жилами и витыми парами жил. Для защиты от механических повреждений кабели могут покрываться сверху броней из стальной проволоки — бронированные кабели (рис. 5.2, а).

Общий медный экран (рис. 5.2, б) защищает передаваемые по жилам сигналы от внешних переменных электрических полей. Кабели с отдельными экранированными жилами (рис. 5.3, а) используют для исключения взаимного влияния сигналов, передаваемых в одном кабеле. Это особенно касается маломощных сигналов, например сигналов от датчиков температуры.

Витая пара жил (рис. 5.3, б) защищает передаваемый сигнал от внешних магнитных полей, создаваемых работающими вблизи кабельных трасс трансформаторами, сварочными аппаратами, электро-

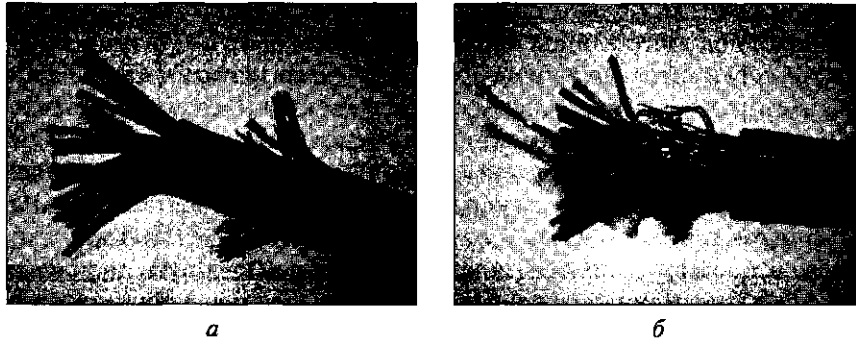


Рис. 5.2. Бронированный (а) и экранированный (б) кабели

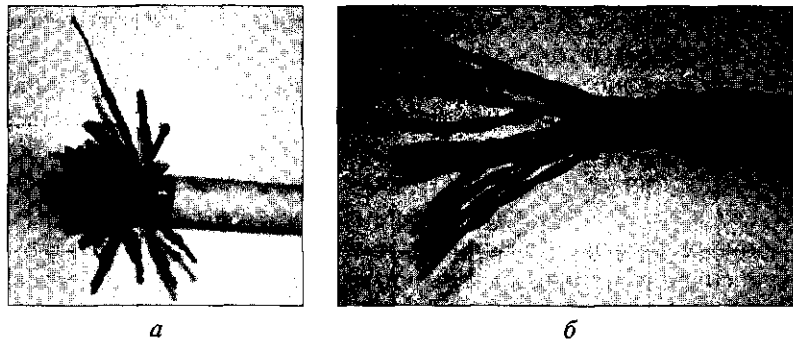


Рис. 5.3. Кабели с экранированными жилами (а) и витыми парами (б)

двигателями и т. д. Пересекая жилы витой пары, переменное магнитное поле в соответствии с законом электромагнитной индукции наводит в них ЭДС определенного знака. На длине, равной периоду скрутки, знаки ЭДС противоположны и суммарная ЭДС равна нулю. Чем меньше период скрутки, тем меньшее влияние магнитные поля оказывают на передаваемый сигнал.

Большую роль в передаче сигналов играет способ прокладки информационных и управляющих кабелей. Наиболее применимые способы прокладки — на лотках и в коробах. В обоих случаях рекомендуется во избежание влияния мощных управляющих сигналов на слабые сигналы от датчиков информационные кабели прокладывать отдельно от управляющих на своих лотках (рис. 5.4, а) или в своих коробах (рис. 5.4, б). При этом расстояние между лотками (коробами) должно быть не менее 300 мм.

На стороне аппаратуры управления концы информационных и управляющих кабелей подводятся и подключаются к клеммным

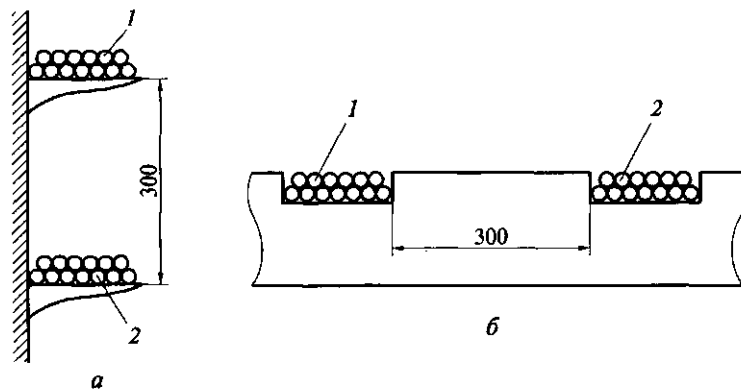


Рис. 5.4. Прокладка кабелей на лотках (а) и в коробах (б):  
1 — информационные кабели; 2 — кабели управления

стойкам, которые представляют собой набор клеммных колодок, располагаемых на специальных рельсах. К одной стороне этих колодок и подключаются кабели. Ко второй стороне подключаются кабели, заканчивающиеся разъемами, которые подсоединяются к блокам системы управления (устройствам нормализации сигналов, запоминающим устройствам, выходным регистрам и т. д.).

Весь комплекс переходных устройств показан на рис. 5.5.

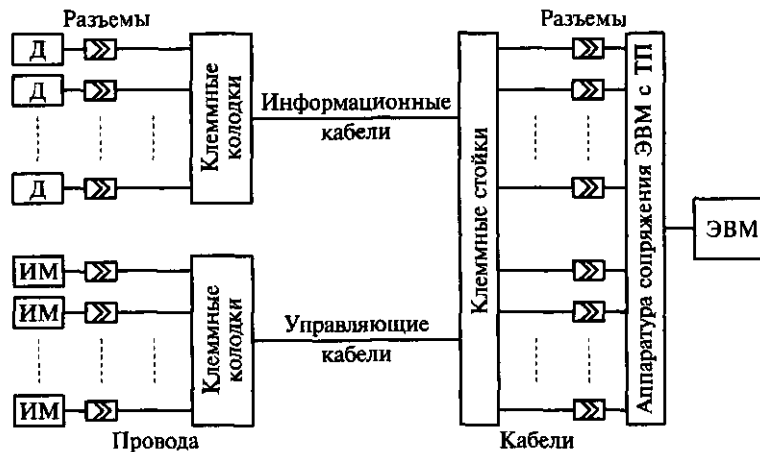


Рис. 5.5. Комплекс переходных устройств:  
Д — датчик; ИМ — исполнительный механизм

Таким образом, переходные устройства в процессе передачи сигнала играют такую же важную роль, как и остальные технические средства АСУ ТП.

## 5.2. УСТРОЙСТВА НОРМАЛИЗАЦИИ СИГНАЛОВ

### 5.2.1. Общие сведения

Нормализацией считают любое преобразование сигналов с аналоговых датчиков, кроме их усиления и аналого-цифрового преобразования. Устройства нормализации являются самыми первыми средствами обработки сигналов на пути от датчиков технологических параметров до оператора или исполнительного механизма, воздействующего на технологический процесс.

Основными причинами, вызывающими необходимость применения этих устройств, являются:

- наложение на сигналы помех в виде переменного напряжения, в основном промышленной частоты 50 Гц, созданных работающим оборудованием, сетями энергоснабжения и мощными управляющими сигналами, создаваемыми самой системой управления;

- потребность согласования параметров датчиков и сигналов с характеристиками устройств, обеспечивающих дальнейшее преобразование сигналов.

Устройства нормализации сигналов представляют собой простые электрические цепи, состоящие из нескольких элементов — резисторов, конденсаторов или катушек индуктивности. Они размещаются максимально близко ко входам усилителей, аналого-цифровых преобразователей и других устройств, которые производят дальнейшее преобразование сигналов.

### 5.2.2. Фильтры

Ослабление наведенных помех промышленной частоты и особенно высокочастотных помех от срабатывания пускателей и реле обеспечивают с помощью простейших  $RC$ -фильтров, содержащих резистор  $R$  и конденсатор  $C$  (рис. 5.6,  $a$ ). Для большинства сигналов эта схема обеспечивает достаточное подавление, но при необходимости можно включить последовательно два таких звена. Конденсатор фильтра обычно имеет большую емкость (от десятков до сотен микро-

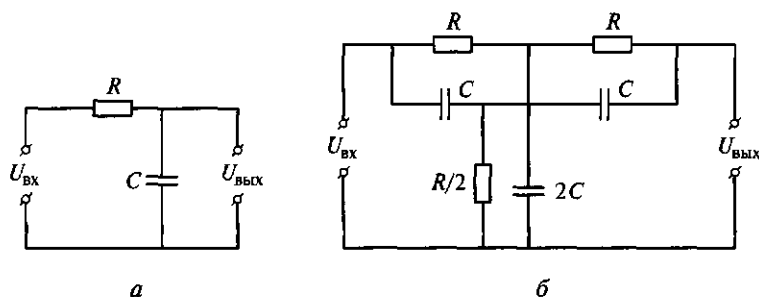


Рис. 5.6. AC-фильтры:  
 а — однозвенный; б — двойной Т-образный

фарад), поэтому используют электролитические конденсаторы, а для компенсации имеющейся у них индуктивности часто подключают параллельно им еще один конденсатор небольшой емкости.

Если в технологическом процессе используются агрегаты, создающие особо мощные электромагнитные поля промышленной или иной частоты, то применяют двойной Т-образный фильтр (рис. 5.6, б), обеспечивающий сильное подавление сигнала именно на этой частоте.

### 5.2.3. Преобразователи тока в напряжение

Выходным сигналом ряда датчиков является постоянный ток, в то время как устройства дальнейшей обработки сигналов работают с входным сигналом в виде напряжения. Преобразование токовых сигналов  $I_{\text{вых}}$  в сигналы напряжения  $U_{\text{вых}}$  осуществляется с помощью резистора, включенного параллельно входу последующего устройства (рис. 5.7).

Сопротивление резистора определяют исходя из максимально возможного выходного тока датчика и максимально допустимого напряжения на входе измерительного устройства. При этом чем выше уровень сигнала, тем меньше влияние помех и больше точность преобразования. При этом нужно учитывать входное сопротивление самого устройства, которое оказывается параллельным резистору.

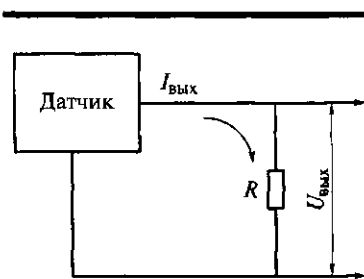


Рис. 5.7. Преобразователь тока в напряжение



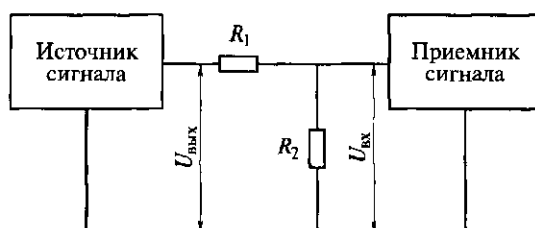


Рис. 5.8. Атенюатор

Точность и стабильность резистора естественно сказываются на точности всего преобразования, поэтому класс точности резистора должен соответствовать погрешности измерительного устройства.

### 5.2.4. Атенюаторы

Некоторые датчики, источники дискретных сигналов технологического оборудования и устройства преобразования сигналов имеют выходное напряжение, превышающее максимально допустимый уровень входного сигнала последующих устройств. Например, с дискретного датчика может поступать напряжение 12 В, в то время как стандартное входное напряжение регистров и счетчиков составляет всего 5 В. В таком случае для ослабления сигналов применяют аттенюаторы.

Аттенюатор, или делитель напряжения, состоит из двух последовательно соединенных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , которые подключаются к выходу источника сигнала  $U_{\text{вых}}$  (рис. 5.8). Напряжение  $U_{\text{вх}}$  на следующее устройство подается с одного из этих резисторов, например с  $R_2$ . Оно оказывается ослабленным по сравнению с исходным сигналом в  $n$  раз, где  $n = (R_1 + R_2)/R_2$ .

Величина  $n$  зависит также от выходного сопротивления источника сигнала, которое в идеале равно нулю, и от входного сопротивления последующего устройства, в идеале бесконечно большого. Точность аттенюатора определяется не точностью самих резисторов, а точностью соблюдения соотношения их сопротивлений, поэтому обычно их подбирают сразу парами.

### 5.2.5. Мостовые измерительные цепи

Параметрические датчики самых различных типов имеют в качестве выходной величины изменение одного из электрических параметров: сопротивления, индуктивности или емкости. Проблема

в том, что эти параметры имеют какие-то значения даже при отсутствии входного воздействия на датчик. В результате после непосредственного преобразования этих параметров в более удобную для дальнейшей обработки величину — напряжение — получаются ненулевые его значения при нулевом воздействии на датчик, т. е. при нулевом значении технологического параметра. Естественно, это создает неудобство как для оператора, затрудняя восприятие им информации о параметрах технологического процесса, так и для устройств дальнейшей обработки сигналов.

Для устранения такого сдвига напряжения было бы естественным сдвинуть соответственно нулевой уровень входного сигнала устройства, на которое поступает сигнал от датчика. Проведем аналогию: для измерения высоты бьющей вверх струи фонтана надо брать в качестве нулевого уровня не уровень земли, а тот уровень, на котором находится сопло фонтана, иначе может получиться результат в несколько метров даже при выключенном фонтане. Сдвиг нулевого уровня означает, что нужно создать напряжение, равное сигналу с датчика при нулевом воздействии на него, и уже от этого напряжения отсчитывать значение сигнала. Это можно сделать с помощью мостовой измерительной цепи.

На рис. 5.9, *а* показана мостовая цепь, образованная тремя резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и выходным сопротивлением датчика  $R_d$ . Она питается от источника напряжения  $E_{пит}$ . Сопротивления резисторов подбираются так, что  $R_1/R_2 = R_3/R_d$ . Следовательно, напряжения на сопротивлениях  $R_2$  и  $R_d$  одинаковы и их разность  $U_{вых}$  равна нулю. Это напряжение и является выходной величиной мостовой цепи.

При воздействии на датчик со стороны технологического параметра сопротивление датчика  $R_d$  изменяется, соответственно изме-

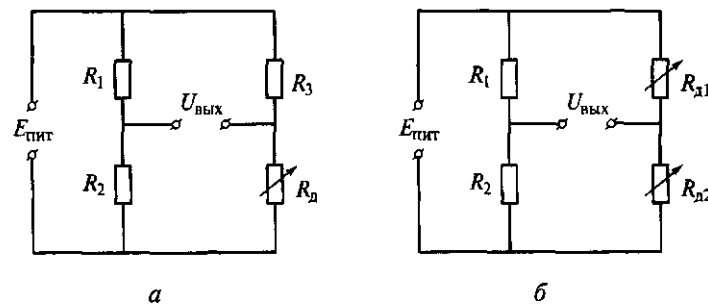


Рис. 5.9. Мостовые измерительные цепи:  
*а* — простейшая; *б* — для дифференциального датчика

няется и напряжение на нем. Теперь оно отличается от напряжения на  $R_2$  и разность этих напряжений (выходной сигнал мостовой цепи  $U_{\text{вых}}$ ) становится отличной от нуля, причем она может быть как положительной, так и отрицательной.

Приведенная мостовая цепь является самой простой, и ее функция преобразования линейна в очень узком диапазоне. При работе такой цепи с дифференциальным датчиком с выходными сопротивлениями  $R_{\Delta 1}$  и  $R_{\Delta 2}$  (рис. 5.8, б) диапазон линейности существенно расширяется.

Если выходная величина датчика — индуктивность или емкость, то мостовая цепь должна питаться от источника переменного напряжения (см. рис. 4.12). В этом случае цепь немного усложняется, но принцип ее работы остается тем же.

### 5.3. УСИЛИТЕЛИ

*Усилители* — это устройства, усиливающие сигналы за счет внешнего источника энергии.

Сигналы могут иметь различную физическую природу: электрические, гидравлические, пневматические и др. Соответственно и усилители этих сигналов относятся к электрическим, гидравлическим и другим устройствам. Как уже неоднократно отмечалось ранее, в автоматических системах используют, как правило, электрические сигналы. Поэтому далее рассмотрены в основном электронные усилители.

Одним из основных параметров усилителя является его коэффициент усиления. В электронных усилителях различают коэффициент усиления по напряжению, по току и по мощности. Когда речь идет об усилении слабых сигналов датчиков до значений, позволяющих измерить величину сигнала с необходимой точностью (обычно это уровень от долей вольта до нескольких вольт), приходится усиливать напряжение:

$$U_{\text{вых}} = K_U U_{\text{вх}},$$

где  $U_{\text{вых}}$  — напряжение на выходе усилителя;  $K_U$  — коэффициент усиления напряжения усилителем;  $U_{\text{вх}}$  — напряжение на входе усилителя.

*Коэффициент усиления по напряжению* — это отношение напряжения на выходе усилителя к напряжению на его входе.

Управляющие сигналы для исполнительных механизмов обычно очень слабы для непосредственного воздействия на эти механизмы, и

их усиливают по току или по мощности до нужных значений (вплоть до киловатт).

Коэффициенты усиления по току и по мощности определяются аналогично коэффициенту усиления по напряжению:

$$K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}; K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}.$$

Зависимость выходного напряжения от входного во всем диапазоне изменений входного напряжения называется *амплитудной характеристикой* усилителя:

$$U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх}}).$$

Амплитудная характеристика реального усилителя показана на рис. 5.10. На характеристике выделены три зоны: А, В и С.

Зона А соответствует нулевому входному сигналу, но напряжение на выходе усилителя отлично от нуля — оно равно так называемому напряжению шумов, связанному с процессами, происходящими внутри усилительных элементов (транзисторов, микросхем), а также с внешними электромагнитными наводками.

От минимального входного напряжения  $U_{\text{вх min}}$ , для которого гарантированы точностные характеристики усилителя, до максимального напряжения  $U_{\text{вх max}}$ , удовлетворяющего этим гарантиям, длится участок В, на котором амплитудная характеристика усилителя линейна. На участке С начинается насыщение усилителя, когда напряжение на его выходе приближается к напряжению источника питания, и он больше не может обеспечивать требуемый коэффициент усиления. Штриховой линией на рис. 5.10 показана идеальная амплитудная характеристика. Конечно, реальное напряжение шумов гораздо меньше, чем можно судить по рис. 5.10; участок А показан таким большим только для наглядности.

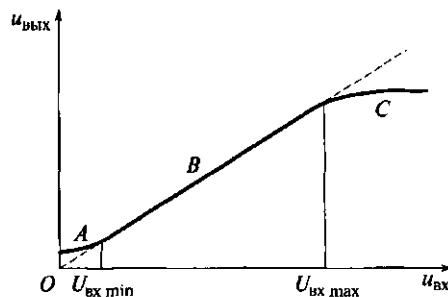


Рис. 5.10. Амплитудная характеристика усилителя

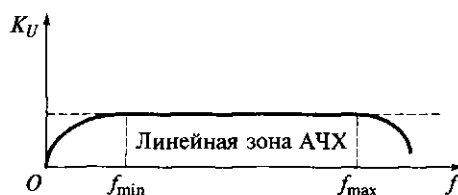


Рис. 5.11. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

При изменении частоты  $f$  входного напряжения коэффициент усиления усилителя может изменяться. Зависимость  $K_U = F(f)$  называется *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)*.

На рис. 5.11 приведена реальная амплитудно-частотная характеристика усилителя, по которой видно, что постоянство коэффициента усиления обеспечивается только в определенном диапазоне частот входного сигнала от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ . На низких и высоких частотах коэффициент усиления падает. Это связано, в первую очередь, с наличием в усилителях конденсаторов, сопротивление которых переменному току зависит от частоты этого тока. В современной электронике распространены усилители постоянного тока, в которых межкаскадные конденсаторы отсутствуют, и коэффициент усиления остается неизменным даже на самых низких частотах. Штриховой линией на рис. 5.11 показана идеальная АЧХ.

В автоматических системах контроля и управления сигналы, поступающие от датчиков на входы усилителей, пропорциональны различным технологическим параметрам. Эти параметры могут изменяться (быстро или медленно), а могут оставаться постоянными. Поэтому в таких системах целесообразно применение *усилителей постоянного тока*, которые усиливают как постоянные или медленно изменяющиеся сигналы, так и сигналы, изменяющиеся очень быстро, что очень важно в аварийных ситуациях, когда параметры, имеющие обычно постоянные или медленно меняющиеся значения, могут быстро изменяться в течение коротких промежутков времени.

В качестве таких универсальных усилителей используют *операционные усилители*, выполненные обычно на микросхемах. Это усилители постоянного тока, обладающие очень высоким коэффициентом усиления (до десятков тысяч) и имеющие дифференциальный вход, т. е. фактически два входа (прямой и инверсный), причем выходной сигнал пропорционален разности напряжений на этих входах:

$$U_{\text{вых}} = K_U (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}).$$

Так как напряжение всегда передается по двухпроводной линии, его можно подводить или к двум входам усилителя, или к одному из входов относительно нулевой точки усилителя. Выходной сигнал также снимается относительно этой нулевой точки. Если напряжение подается только на прямой вход, то  $U_{\text{вых}} = K_U U_{\text{вх1}}$ , а если только на инверсный, то  $U_{\text{вых}} = -K_U U_{\text{вх2}}$ .

На рис. 5.12 показаны условное обозначение операционного усилителя на принципиальных схемах, его амплитудная и амплитудно-частотная характеристики. В зависимости от входного сигнала выходное напряжение операционного усилителя может быть как положительным, так и отрицательным, что обеспечивается питанием усилителя от двух источников напряжения:  $+E_{\text{п}}$  и  $-E_{\text{п}}$ . Когда выходное напряжение приближается к этим значениям, начинается насыщение усилителя и его амплитудная характеристика искажается.

Коэффициент усиления операционного усилителя можно легко регулировать, вводя отрицательную обратную связь с выхода усилителя на его инверсный вход (рис. 5.13). Изменение напряжения на выходе всегда противоположно по знаку изменению напряжения на инверсном входе, т. е. эти напряжения всегда в противофазе. Подавая часть напряжения с выхода на вход, можно частично подавлять вход-

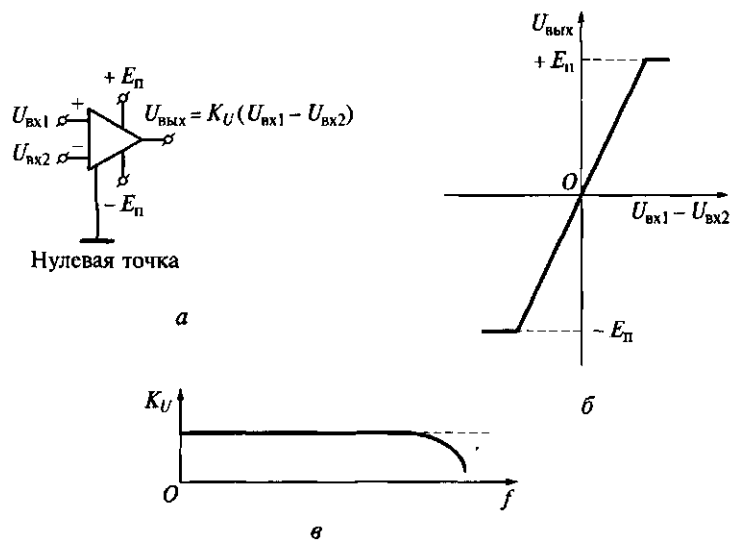


Рис. 5.12. Операционный усилитель:

а — графическое обозначение; б — амплитудная характеристика [ $+E_{\text{п}}$ ,  $-E_{\text{п}}$  — напряжения питания усилителя]; в — АЧХ

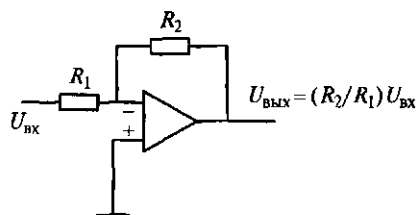


Рис. 5.13. Операционный усилитель с отрицательной обратной связью

ной сигнал, уменьшая тем самым коэффициент усиления, поэтому такая обратная связь и называется отрицательной. Нужный коэффициент устанавливается за счет изменения сопротивления одного из резисторов в цепи обратной связи (обычно  $R_2$ ). Можно считать, что коэффициент усиления с обратной связью  $K_{о.с}$  равен:

$$K_{о.с} = R_2/R_1.$$

Операционные усилители с большим коэффициентом усиления и без обратной связи широко используются в автоматических системах в качестве *компаратора* — устройства сравнения напряжений.

Если на два входа такого усилителя подать два напряжения (для обоих напряжений вторая точка — нулевая точка усилителя), то в соответствии с приведенной ранее формулой  $U_{вых} = K_U (U_{вх1} - U_{вх2})$  напряжение на выходе будет зависеть от разности входных сигналов. Но при большом коэффициенте усиления даже очень маленькая разница напряжений выведет усилитель в состояние насыщения, когда напряжение на его выходе практически станет равным напряжению питания. Если теперь одно напряжение будет становиться то чуть больше, то чуть меньше другого, то выходной сигнал усилителя будет меняться скачком от  $-E_n$  до  $+E_n$ , и наоборот.

Такой большой перепад на выходе компаратора, легко регистрируемый средствами обработки дискретных сигналов, позволяет создавать очень чувствительные устройства сравнения напряжений. Например, на один вход может подаваться сигнал  $U_{вх}$  от датчика параметра, а на другой вход — постоянное напряжение  $U_0$ , равное сигналу датчика при предельно допустимом значении этого параметра. Теперь как только параметр превысит предельное значение, напряжение  $U_{вх}$  превысит  $U_0$ , что вызовет перепад напряжения на выходе компаратора, воспринимаемый системой как аварийный сигнал.

Так как при очень большом коэффициенте усиления  $K_U$  разность напряжений ( $U_{вх1} - U_{вх2}$ ), приводящая к срабатыванию компаратора, чрезвычайно мала, можно считать, что компаратор фиксирует момент равенства напряжений на его входах.

Для управления исполнительными механизмами в АСУ ТП используют транзисторные усилители постоянного и переменного тока

с небольшим коэффициентом усиления (100...500), но с большой выходной мощностью (до 200 Вт).

Если мощность, потребляемая исполнительными механизмами, составляет киловатты и более, то применяют *магнитные усилители*. Их работа основана на способности ферромагнитных материалов в сильных магнитных полях переходить в состояние насыщения.

Обмотки 1 и 3 магнитного усилителя (рис. 5.14), которые питаются от источника переменного напряжения  $U_{\sim}$ , создают переменное магнитное поле, пронизывающее сердечник и создающее в нем магнитный поток. Согласно закону электромагнитной индукции, чем больше этот поток, тем больше индуктивность имеющихся на сердечнике обмоток и меньше ток, проходящий через них. Если сердечник введен в состояние насыщения, то пронизывающее его магнитное поле уже не в состоянии создать в нем большой магнитный поток. В результате индуктивность обмоток существенно уменьшается, а ток, проходящий через них, растет. Таким образом, управляя переходом сердечника в состояние насыщения, можно управлять током в цепи обмоток — выходной величиной усилителя.

Управлять состоянием насыщения можно, изменяя значение управляющего постоянного напряжения  $U_{упр}$ , подаваемого на обмотку подмагничивания 2. Это напряжение рассматривается как входная величина магнитного усилителя. При его увеличении материал сердечника приближается к состоянию насыщения, причем даже небольшие изменения управляющего напряжения при-

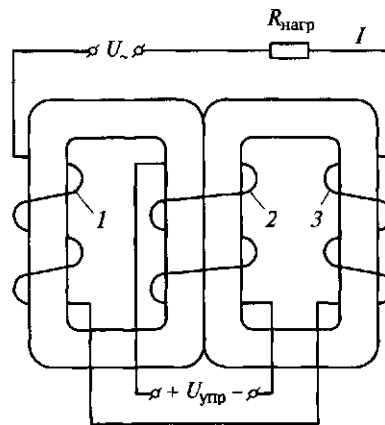


Рис. 5.14. Схема магнитного усилителя:

1...3 — обмотки



водят к значительным изменениям тока  $I$  (выходной величины) в обмотках.

Простота и большая выходная мощность магнитных усилителей привели к их широкому применению в автоматических системах. Основной их недостаток — большая инерционность.

## 5.4. ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА

### 5.4.1. Общие сведения

Цифровые устройства автоматики — это, как правило, электронные устройства, работающие в дискретном режиме, т. е. они могут находиться только в определенных фиксированных состояниях. Цифровыми они называются потому, что их состояния могут быть обозначены цифрами: 1, 2, 3-е и т. д. Поскольку цифровые устройства используются с ЭВМ, которая сама является цифровым устройством, то принято использовать для обозначения состояний цифры двоичной системы счисления, удобные для выполнения операций в арифметико-логическом устройстве ЭВМ. В двоичной системе счисления две цифры: 0 и 1, но существуют разряды, как и в десятичной системе. Поэтому состояния цифровых устройств можно обозначить, например, следующим образом: первое обозначить цифрой 0; второе — цифрой 1; третье потребует введения второго разряда и обозначится 10 (не десять, а один—ноль), четвертое — 11 (один—один), пятое — 100 (один—ноль—ноль), шестое — 101 (один—ноль—один) и т. д.

Цифровые устройства в автоматических системах используются:

- для получения и хранения информации с датчиков дискретных параметров (состояния и количества объектов);
- выбора порядка опроса датчиков;
- формирования дискретных управляющих воздействий («включить—выключить», «открыть—закрыть», «перевести в положение 5» и т. д.);
- управления очередностью выполнения операций;
- обмена информацией с ЭВМ.

Например, в режиме программно-логического управления именно цифровые устройства обеспечивают такую последовательность операций:

- включить пускатель П1;
- открыть клапан К1;
- когда давление в системе достигнет значения Р1, открыть вентиль В1 на 30° (положение З) и т. д.

Все цифровые устройства, выполняющие перечисленные функции, строятся на основе триггера.

### 5.4.2. Триггеры

Триггер — это устройство, имеющее два устойчивых состояния равновесия и выполняющее роль электронного реле.

Состояния триггера обозначаются цифрами 0 и 1.

Основу электронного триггера составляют два транзисторных элемента, называемых ключами (рис. 5.15). В ключе транзистор может находиться в одном из двух состояний: или он открыт, т. е. через него течет ток, или он закрыт, т. е. тока нет. Ключи в триггере соединены так, что если один из них находится в открытом состоянии, то другой — обязательно в закрытом, и наоборот. При открытом транзисторе напряжение на его выходе близко к нулю, а при закрытом — к напряжению источника питания. Поэтому открытое состояние условно обозначают 0, а закрытое 1.

Если на вход закрытого транзистора поступает открывающий импульс напряжения, то он переводит транзистор в открытое состояние и напряжение на выходе транзистора уменьшается, т. е. формируется сигнал 0. При этом второй транзистор, ранее откры-

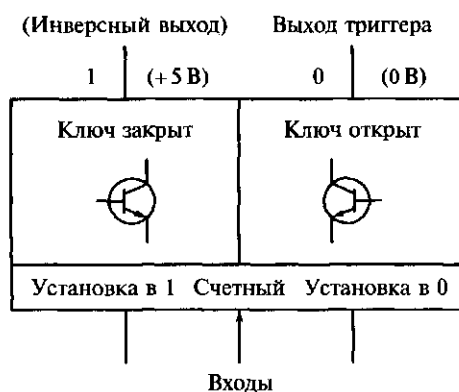


Рис. 5.15. Триггер в состоянии 0

тый, переходит в закрытое состояние и напряжение на его выходе возрастает (сигнал 1). Если теперь открывающий импульс поступит на вход второго транзистора, то снова установится первоначальное состояние триггера.

Приняв выход одного из транзисторов за выход всего триггера, мы можем обозначить состояния триггера 0 и 1. Тогда можно утверждать, что поступление импульса на один вход триггера устанавливает его в состояние 0, а на другой вход — в состояние 1. Состояние 0 триггера обычно принимают за исходное; при этом выходом триггера считают выход открытого в этом состоянии транзистора, на котором напряжение равно 0 (сигнал 0). Этот выход называют прямым, а выход другого транзистора — инверсным. При создании цифровых устройств, например счетчиков импульсов, используют сигналы как с прямого, так и с инверсного выходов.

Соединив входы транзисторов так, чтобы входные импульсы могли поступать сразу на оба транзистора, можно организовать еще один вход триггера — счетный. При подаче открывающего импульса на этот вход откроется тот транзистор, который в этот момент находится в закрытом состоянии. Поскольку при переключении триггера закрыт то один транзистор, то другой, поступление импульсов на счетный вход переводит триггер последовательно из одного состояния в другое и обратно, что позволяет использовать его в качестве счетчика импульсов.

### 5.4.3. Регистры

*Регистр* — это устройство для хранения информации, представленной в двоичной форме.

Регистр представляет собой группу триггеров с общим входом установки в 0. Регистр, в котором все триггеры независимы, называется параллельным (рис. 5.16, а). Сигналы (например, с дискретных датчиков) поступают параллельно на входы всех триггеров, образуя на выходе регистра сочетание нулей и единиц (параллельный код). Для установки регистра в исходное состояние на общий вход установки в 0 всех триггеров подается соответствующий сигнал.

В ряде случаев, например при выполнении операций с двоичными кодами в процессоре компьютера или для управления коммутатором, требуется сдвигать код, занесенный в регистр, на один или несколько разрядов. Для этого триггеры соединяют между собой так, как показано на рис. 5.16, б, образуя сдвиговый регистр. Он представляет собой цепочку соединенных последовательно триггеров, для которых

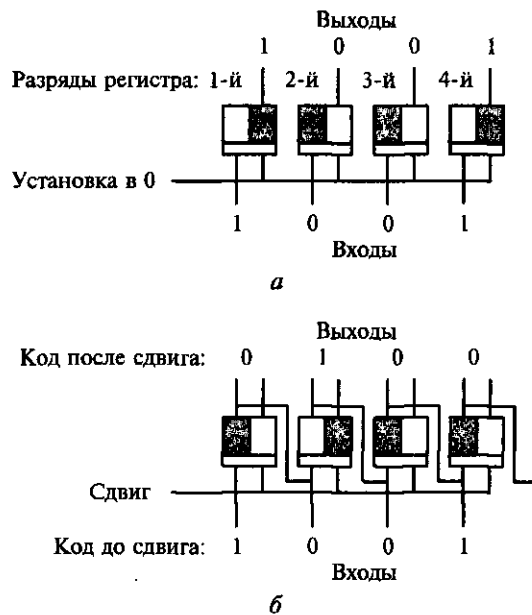


Рис. 5.16. Четырехразрядный регистр:  
а — параллельный; б — сдвиговый

общий сигнал установки в 0 становится сигналом сдвига хранящейся информации на один разряд. При поступлении сигнала «Сдвиг» каждый триггер, находившийся в состоянии 1, переключается в состояние 0 и при этом передает следующему триггеру импульс установки в 1. Если следующий триггер был в состоянии 0, то он устанавливается этим импульсом в состояние 1. Триггер, находившийся в состоянии 0, не может переключить следующий триггер.

#### 5.4.4. Счетчики

*Счетчик импульсов* — это устройство, предназначенное для подсчета поступающих на его вход электрических импульсов.

Результат подсчета количества импульсов представляется в двоичном коде, т. е. в виде двоичного числа.

Счетчики строятся на базе триггеров. Поскольку один триггер представляет собой один разряд двоичного числа, то для формирования, например, 8-разрядного числа требуется восемь триггеров. Триггеры соединяются последовательно, как показано на рис. 5.17.

В отличие от сдвиговых регистров в счетчиках импульсы подаются на счетные входы триггеров. Благодаря этому с каждым пришедшим импульсом происходит смена состояния триггера независимо от того, в каком состоянии он перед этим находился. Но на следующий триггер импульс поступает, как и в сдвиговом регистре, только тогда, когда предыдущий триггер переходит из состояния 1 в состояние 0. Сигналы на выходах триггеров формируют двоичное число, значение которого равно количеству поступивших на счетчик импульсов.

Максимальное количество импульсов, которые может сосчитать счетчик, равно количеству его возможных состояний, т. е. количеству различных комбинаций состояний триггеров счетчика. Так, для счетчика с двумя триггерами количество возможных состояний — четыре; они соответствуют двоичным числам на выходе счетчика 00, 01, 10 и 11. При трех триггерах количество состояний — восемь, от 000 до 111. В общем случае, если в счетчике  $n$  триггеров, число различных состояний счетчика равно  $2^n$ . Так, 8-разрядный счетчик позволяет считать до  $2^8 = 256$ .

В зависимости от того как организованы связи между триггерами, счетчики могут быть суммирующими или вычитающими. Счетчик, показанный на рис. 5.17, суммирующий; количество его различных состояний  $2^4 = 16$ . Первый триггер, на который поступают входные импульсы, образует младший разряд 4-разрядного двоичного числа на выходе счетчика; последний от входа триггер образует старший разряд.

Как происходит подсчет импульсов? Сначала все триггеры устанавливаются в состояние 0, на выходе счетчика — число 0000. Первый входной импульс переключает триггер младшего разряда в состояние 1, число на выходе счетчика становится 0001. Второй импульс возвращает этот триггер в 0, но такой переход переводит триггер второго разряда в 1; число на выходе — 0010 (нуль—нуль—один—нуль). Третий импульс вновь переводит триггер младшего разряда в 1; при этом триггер второго разряда не меняет своего состояния, число на выходе — 0011. Четвертый импульс возвращает триггер младшего

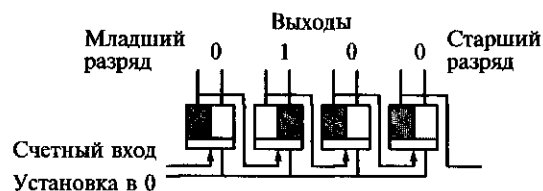


Рис. 5.17. Четырехразрядный счетчик импульсов (число на выходе 0010)

разряда в 0, его выходной сигнал переводит триггер второго разряда в 0, а выходной сигнал этого триггера переводит триггер 3-го разряда в 1; число на выходе счетчика — 0100. Пятый импульс переводит младший разряд в состояние 1, не оказывая влияния на другие разряды, число на выходе — 0101.

Так происходит до тех пор, пока 15-й импульс не установит счетчик в состояние 1111. Следующий, 16-й, импульс должен бы установить на выходе число 10000, но поскольку в этом счетчике только четыре разряда (четыре триггера), число на выходе соответствует значениям только четырех младших разрядов, т. е. 0000. Таким образом, счетчик возвращается в нулевое состояние и готов к новому счету.

При необходимости принудительной установки счетчика в исходное состояние на него поступает команда «Установка в 0» и во всех разрядах триггеры устанавливаются в состояние 0.

*Вычитающий* счетчик строится аналогично, но сигнал на триггер более старшего разряда поступает не с инверсного, а с прямого выхода каждого триггера. Триггер каждого разряда изменяет свое состояние, когда предыдущий триггер переходит из состояния 0 в 1. В результате при поступлении на вход счетчика очередного импульса двоичное число на его выходе уменьшается на 1.

Счетчики, которые позволяют производить как суммирование, так и вычитание поступающих импульсов, называются *реверсивными*. Они имеют или два входа (один — для суммируемых импульсов; другой — для вычитаемых импульсов), или один вход с возможностью переключения счетчика из режима сложения в режим вычитания, и наоборот.

### 5.4.5. Коммутаторы

*Коммутатор* — это электронный или электромеханический переключатель, подключающий в определенном порядке различные электрические цепи к входу или выходу общего для них устройства.

Коммутаторы состоят из управляющих элементов и переключающих элементов. Они работают по принципу шаговых устройств: на каждом шаге срабатывает один элемент коммутатора, подключая одну из цепей.

Управляющим элементом коммутатора обычно является параллельный или сдвиговый регистр. Параллельный регистр получает от ЭВМ код номера цепи, которую следует подключить к входу или выходу коммутатора в данный момент. Сдвиговый регистр используют, когда очередность подключения цепей известна заранее.

В этом случае сдвиговый регистр закольцовывают, соединяя выход последнего триггера регистра с входом первого, и переводят первый триггер в состояние 1. Если теперь подавать на регистр импульсы сдвига, то с каждым импульсом триггеры регистра будут поочередно переходить в состояние 1, т. е. выходной сигнал будет поочередно появляться на всех выходах регистра. В результате электрические цепи будут поочередно подключаться к входу (выходу) коммутатора, причем после подключения последней цепи процесс будет повторяться сначала. Включенный таким образом сдвиговый регистр называется *кольцевым счетчиком*.

Переключающие элементы могут быть контактными или бесконтактными.

В качестве *контактных* переключающих элементов чаще всего используют электромагнитные реле, переключающие цепи перемещением подвижных электрических контактов. Реле способны переключать цепи в широком диапазоне токов и напряжений при малой мощности управляющего сигнала. Они незаменимы при коммутации сверхмалых токов (микроамперы) и напряжений (микровольты), поступающих от некоторых видов датчиков. Современные реле малогабаритные, имеют низкую стоимость, работают в широком диапазоне температур. Их недостаток — большая инерционность (время срабатывания — от единиц до сотен миллисекунд).

Значительно большим быстродействием обладают *бесконтактные* полупроводниковые переключающие элементы — транзисторы

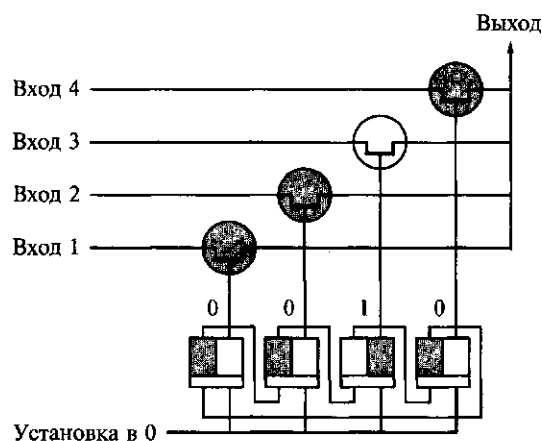


Рис. 5.18. Бесконтактный коммутатор со сдвиговым регистром (затемненные ключи закрыты)

и тиристоры (время их переключения составляет микросекунды). Работа транзисторных ключей уже рассматривалась в подразд. 5.4.2. Для уменьшения взаимного влияния коммутируемых цепей в качестве переключающих элементов используют *полевые транзисторы*, обладающие очень высоким сопротивлением в закрытом состоянии. Тиристоры способны переключать очень большие токи (до сотен ампер), но их быстродействие ниже.

На рис. 5.18 приведена схема бесконтактного коммутатора на полевых транзисторах с четырьмя входами и одним выходом, управляемого сдвиговым регистром.

Коммутаторы, содержащие несколько входов и один выход, называются *мультиплексорами* и используются в автоматических системах обычно для поочередного подключения сигналов от датчиков к входу общего для них усилителя или аналого-цифрового преобразователя. Коммутаторы, имеющие один вход и несколько выходов, называются *демультиплексорами* и используются для подачи управляющих сигналов на нужный исполнительный механизм.

## 5.5. ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 5.5.1. Цифроаналоговые преобразователи

Рассмотренные ранее технические средства работают и с аналоговыми, и с дискретными параметрами и сигналами. Ядро автоматических систем — ЭВМ — работает только с цифровыми кодами. Для объединения всех этих средств и решаемых ими задач в рамках единой системы нужно иметь возможность взаимного преобразования величин. Эту задачу решают цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи.

*Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП)* — это устройство, которое преобразует цифровой код в аналоговую величину, соответствующую десятичному числу — эквиваленту этого кода.

Обычно выходной величиной ЦАП является электрическое напряжение или электрический ток.

Работа цифроаналогового преобразователя основана на двоичной системе счисления. В двоичной системе счисления только две цифры — 0 и 1, но она, как и десятичная система, является позиционной, т. е. «вес» каждой цифры в числе зависит от ее позиции (разряда числа). В десятичной системе каждый более старший разряд «весит»



в 10 раз больше предыдущего. Так, в числе 555 левая пятерка (2-й разряд) «весит» в 10 раз больше, чем средняя (1-й разряд), которая, в свою очередь, в 10 раз «тяжелее» правой (0-й разряд). Это число можно записать следующим образом:

$$555_{10} = 5 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0.$$

В двоичной системе счисления разряды отличаются в 2 раза: в числе 111 (один — один — один) левая единица (2-й разряд) в 2 раза «тяжелее» средней (1-й разряд), которая в 2 раза «тяжелее» правой (0-й разряд). Это число можно записать следующим образом:

$$111_2 = 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Эта запись иллюстрирует принцип работы цифроаналогового преобразователя: любое число в двоичной системе счисления можно представить в виде суммы произведений цифр (0 или 1) на основание системы счисления (2) в степени, равной номеру позиции этой цифры в числе (т. е. номеру разряда), например:

$$10110101_2 = 1 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Иначе говоря, любое двоичное число можно представить как сумму «весов» всех разрядов, в которых в этом числе стоит 1.

Для реализации ЦАП необходимо выбрать «единицу веса» выходной величины, например, значение напряжения или тока, соответствующее «весу» самого младшего разряда числа. Затем в каждом разряде числа, где имеется цифра 1, эта «единица веса» умножается на «вес» данного разряда, после чего напряжения или токи всех разрядов складываются. Например, для представленного ранее двоичного числа 10110101 при выбранной в качестве «единицы веса» силе тока 1 мА итоговая сила тока, соответствующая данному числу, определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{10110101} &= 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^0 = \\ &= 128 + 32 + 16 + 4 + 1 = 181 \text{ (мА)}. \end{aligned}$$

Число 181 — так называемый «десятичный эквивалент» двоичного числа 10110101, поэтому логичным результатом его преобразования в аналоговую величину и является ток силой 181 мА.

На рис. 5.19 представлена схема 4-разрядного цифроаналогового преобразователя, в которой «вес» каждого разряда определяется выбором сопротивления  $R$  цепи, питаемой от источника с напряжением  $E_{пит}$ . Управление током  $I$  в каждой цепи производится с помощью параллельного регистра. Подбор сопротивлений резисторов выполнен так, что ток, включаемый каждым более старшим разрядом,

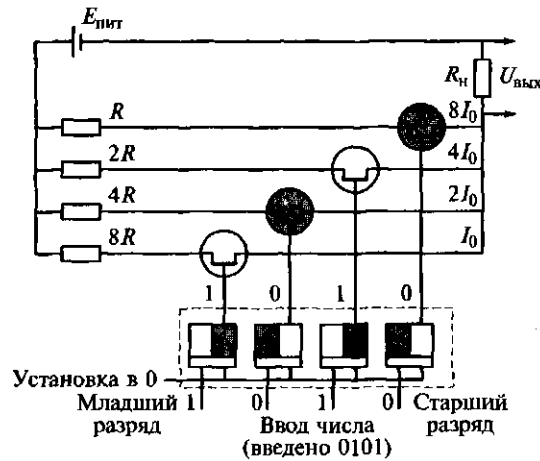


Рис. 5.19. Цифроаналоговый преобразователь (затемненные ключи закрыты)

вдвое больше предыдущего. Все токи суммируются на сопротивлении нагрузки  $R_n$ , выполняющем функцию преобразователя тока в напряжение, которое и является выходной величиной  $U_{\text{вых}}$  преобразователя.

В данном случае на вход ЦАП подано двоичное число 0101. Открыты транзисторы, через которые текут токи  $I_0$  и  $4I_0$ . На нагрузке они суммируются и создают выходное напряжение, соответствующее току  $5I_0$  (5 — десятичный эквивалент числа 0101).

Типичный цифроаналоговый преобразователь имеет 12-разрядный регистр, т. е. количество различных его состояний 4096. Напряжение питания переключаемых цепей обычно выбирается таким, чтобы выходной сигнал преобразователя изменялся от  $-5,12$  до  $+5,12$  В; погрешность преобразования — около 1 %, время преобразования двоичного кода в напряжение — от единиц до десятков микросекунд.

### 5.5.2. Квантование по времени и квантование по уровню

Подавляющее большинство технологических параметров являются аналоговыми, т. е. непрерывно изменяющимися во времени. Привлечение цифрового устройства — ЭВМ — к контролю и управ-

лению технологическими процессами требует решения двух вопросов: в какие моменты времени измерять аналоговые параметры и как преобразовывать в конкретное число значение параметра, которое может быть совершенно произвольным (конечно, в заданных пределах). Ответы на эти вопросы связаны с двумя процессами: квантованием по времени и квантованием по уровню — заменой аналогового (непрерывного) сигнала дискретными (фиксированными, а значит, следующими друг за другом с разрывом) значениями.

В гл. 3 уже рассматривались понятия «дискретная величина» и «дискретный сигнал». Процесс превращения аналогового сигнала в дискретный называется *квантованием сигнала*.

*Квантование по времени* заключается в том, что из аналогового (непрерывного) сигнала  $x$  выбираются отдельные его значения, соответствующие моментам, когда измерительная аппаратура выполняет очередное измерение, т. е. преобразование этого сигнала в цифровой код. Моменты преобразования сигнала обозначены на рис. 5.20, а как  $t_1, t_2$  и т. д. Кружками (см. рис. 5.20, а) показаны значения сигнала в эти моменты, которые являются произвольными. Чем реже будут следовать моменты преобразования сигнала, тем сильнее он может измениться за промежуток времени между двумя преобразованиями, следовательно, снижается точность его преобразования. Поэтому чем быстрее может изменяться входной сигнал, тем чаще должны выполняться его преобразования, т. е. больше должна быть частота квантования.

*Квантование по уровню* заключается в создании шкалы уровней квантования, заполняющей весь диапазон возможных значений непрерывного сигнала  $x$  (рис. 5.20, б). Уровни квантования отстоят

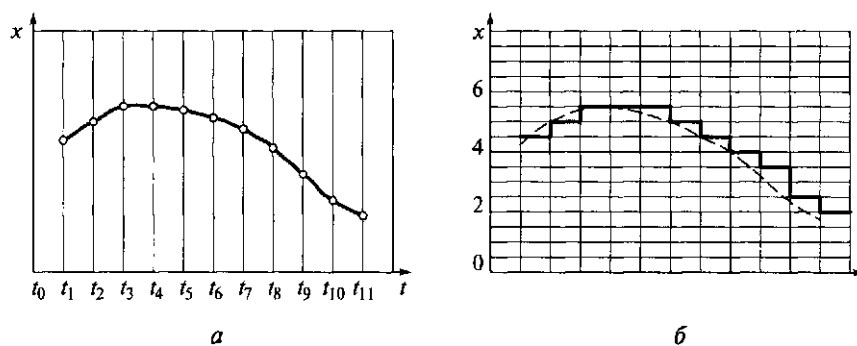


Рис. 5.20. Квантование по времени (а) и квантование по уровню (б) аналоговой величины

друг от друга на шаг квантования, который определяется точностью измерения сигнала используемой аппаратурой. При квантовании точные значения сигнала заменяются на ближайшие к ним значения шкалы квантования, т. е. округляются. Это хорошо видно на рис. 5.20, б, где для сравнения штриховой линией показан входной сигнал. Следовательно, для повышения точности преобразования следует уменьшать шаг квантования, повышая точность измерительной аппаратуры.

В автоматических системах контроля и измерения используют оба вида квантования одновременно. Квантование сигналов по времени позволяет заменить непрерывный процесс отслеживания значения сигнала импульсным, что высвобождает аппаратуру в промежутках между двумя преобразованиями сигнала и позволяет в эти промежутки производить измерения других сигналов. Каждый из сигналов в течение промежутка между двумя преобразованиями считается неизменяющимся. В результате автоматическая система «видит» непрерывный сигнал, показанный штриховой линией на рис. 5.20, б, таким, как он представлен полужирной линией на этом рисунке.

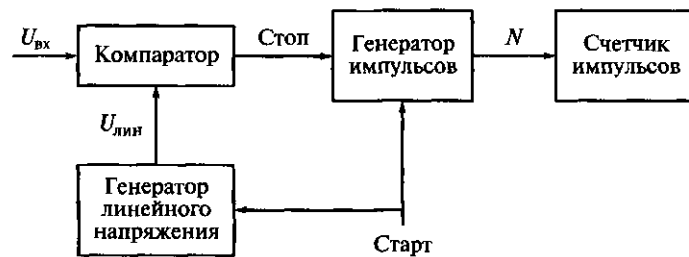
### 5.5.3. Аналого-цифровые преобразователи

Для получения информации о значении технологического параметра в виде числа, выводимого оператору, сохраняемого в памяти ЭВМ или используемого для расчета и формирования управляющего воздействия на исполнительный механизм, сигнал с аналогового датчика должен быть преобразован в числовую форму. Это делается с помощью аналого-цифрового преобразователя.

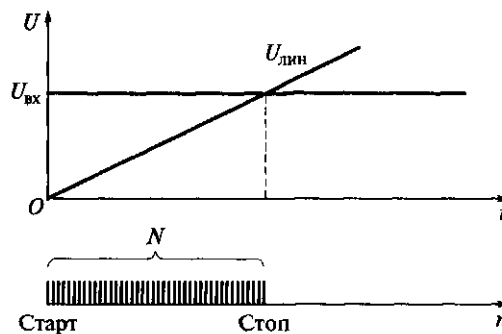
*Аналого-цифровой преобразователь* — это устройство, преобразующее аналоговый сигнал в цифровой код.

Существует несколько методов аналого-цифрового преобразования, рассмотрим два из них.

АЦП с *промежуточным преобразованием в интервал времени* (рис. 5.21) формирует импульс напряжения, постоянный по уровню, но имеющий длительность, пропорциональную входному сигналу. Принцип работы такого преобразователя заключается в том, что измеряемое напряжение сравнивается с линейно возрастающим напряжением  $U_{\text{лин}}$ , вырабатываемым специальным генератором по команде «Старт». Чем больше измеряемое напряжение  $U_{\text{вх}}$ , тем дольше будет нарастать напряжение генератора, пока не сравняется с измеряемым. Момент равенства напряжений определяется компаратором, формирующим команду «Стоп».



а



б

Рис. 5.21. Блок-схема (а) и принцип работы (б) АЦП с промежуточным преобразованием в интервал времени

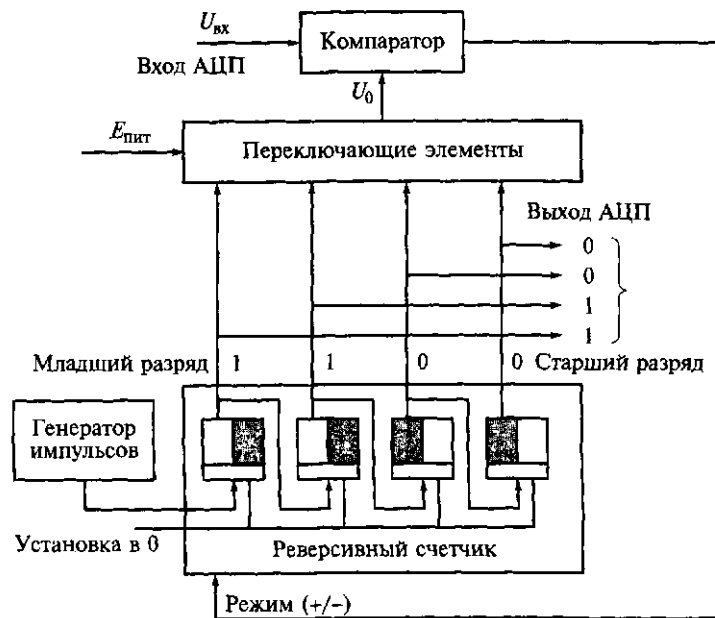
Интервал времени от команды «Старт» до команды «Стоп» измеряется путем подсчета количества импульсов  $N$ , поступающих за это время на вход счетчика импульсов. Результат подсчета, т. е. код на выходе счетчика, пропорционален интервалу времени, а следовательно, и измеряемому напряжению.

Погрешность этого преобразователя зависит от стабильности и точности генератора линейно возрастающего напряжения, а также от частоты импульсов, заполняющих интервал времени, и стабильности генератора этих импульсов. Кроме того, точность зависит от чувствительности компаратора.

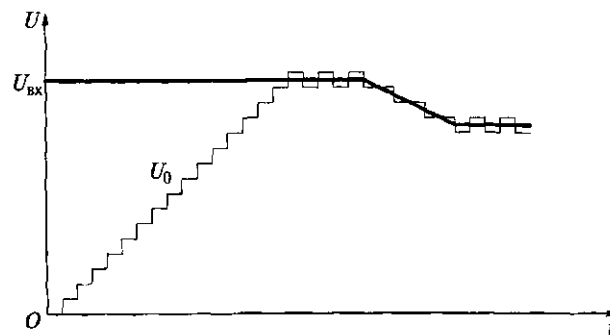
Достоинство такого АЦП — его простота, недостаток — низкая помехозащищенность, в том числе из-за того, что результат зависит от одномоментной ситуации — реального значения входного напряжения в момент фиксации компаратором его равенства линейно возрастающему напряжению.

Этого недостатка лишены *следящие АЦП*, цифровой код на выходе которых в любой момент соответствует реальному значению входного сигнала в этот момент.

Блок-схема следящего АЦП приведена на рис. 5.22, а. Преобразование входного напряжения в двоичный код производится с



а



б

Рис. 5.22. Следящий АЦП:  
а — блок-схема; б — графики напряжений

помощью цифроаналогового преобразователя, управляемого реверсивным счетчиком. Реверсивный счетчик, как уже указывалось ранее, работает как на сложение, так и на вычитание, поэтому при поступлении импульсов на его вход код на выходе счетчика может как увеличиваться, так и уменьшаться — это зависит от режима, в который установлен счетчик командой «Режим».

Выходное напряжение цифроаналогового преобразователя  $U_0$  подается на компаратор, ко второму входу которого подведено входное напряжение  $U_{вх}$ . В начальный момент все триггеры счетчика установлены в состояние 0 и код на выходе, например, 4-разрядного счетчика — 0000. Этому коду соответствует нулевое значение напряжения  $U_0$ .

С каждым поступающим импульсом код счетчика и выходное напряжение ЦАП увеличиваются, пока  $U_0$  не превысит  $U_{вх}$  (рис. 5.22, б). В этот момент срабатывает компаратор и переключает реверсивный счетчик, устанавливая его в режим вычитания. С очередным импульсом код счетчика уменьшается на 1; при этом уменьшается на одну ступеньку и напряжение  $U_0$  на выходе ЦАП, которое вновь оказывается меньше входного напряжения. Компаратор вновь возвращает счетчик в режим сложения, и следующий импульс увеличивает код счетчика и напряжение  $U_0$ . Компаратор снова переключает счетчик в режим вычитания и т. д. В результате напряжение  $U_0$  колеблется около значения входного напряжения, как бы следя за ним (поэтому такое название — «следящий АЦП»).

Так как напряжения на входах компаратора в любой момент практически равны, а  $U_0$  определяется кодом счетчика, то этот код является цифровым эквивалентом  $U_{вх}$ , а значит, выходным сигналом аналого-цифрового преобразователя.

Погрешность следящего АЦП определяется точностью ЦАП, чувствительностью компаратора и частотой импульсов, поступающих на вход счетчика: чем выше частота импульсов, тем точнее может быть выполнено преобразование, в том числе быстроизменяющихся напряжений. Такие аналого-цифровые преобразователи выпускаются в виде микросхем; время преобразования составляет несколько микросекунд; погрешность — менее 1 %.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что включают в себя переходные устройства?
2. Какие кабели лучше использовать для защиты сигналов от электрических полей?

3. Какие кабели лучше использовать для защиты сигналов от магнитных полей?
4. Как правильно проложить кабели управления на лотках и в коробах?
5. Какова роль устройств нормализации сигналов?
6. Для чего используют фильтры?
7. Какова функция аттенюаторов?
8. В каких случаях применяют мостовую измерительную цепь?
9. Что такое усилитель?
10. Назовите основные параметры и характеристики электронного усилителя.
11. Какие усилители напряжения применяются преимущественно в АСУ ТП и почему?
12. Как можно регулировать коэффициент усиления в операционном усилителе?
13. Что такое компаратор?
14. Как работает магнитный усилитель?
15. Что такое цифровые устройства и каково их назначение?
16. Что такое триггер? Какую роль он выполняет в цифровых устройствах?
17. Что такое регистр?
18. Дайте определение счетчика импульсов. Что составляет его основу?
19. Сколько триггеров необходимо использовать в счетчике для подсчета 256 импульсов?
20. Как происходит подсчет импульсов?
21. Что такое мультиплексор и демultipлексор?
22. Дайте определение цифроаналогового преобразователя.
23. Что положено в основу работы цифроаналогового преобразователя?
24. Что такое квантование сигнала?
25. Дайте определение аналого-цифрового преобразователя.
26. Назовите две основные схемы построения аналого-цифровых преобразователей.
27. Какие основные элементы входят в состав АЦП с промежуточным преобразованием в интервал времени?
28. Какие основные элементы входят в состав следящего АЦП?



## ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Любое действие любого алгоритма, которое мы в состоянии выполнить, мы совершаем универсальным инструментом, данным нам природой, — руками. Причем, как правило, не голыми руками, а с помощью отвертки, карандаша, молотка, т. е. какого-либо рабочего инструмента, который воздействует на предмет нашего труда. Движениями наших рук управляет мозг, получивший нужную информацию от датчиков — глаз. Руки исполняют команды, выработанные мозгом, и приводят в нужное движение инструменты. Можно сказать, что наши руки — исполнительные механизмы, приводящие в действие рабочие органы (инструменты), непосредственно воздействующие на предмет труда.

Рассмотрим технические системы. Итак, датчики выдали информацию о технологических параметрах, ЭВМ проанализировала ее и выработала управляющие сигналы. Эти сигналы передаются на исполнительные механизмы. Они являются последним элементом в цепи управления или регулирования и приводят в действие рабочие (регулирующие) органы в соответствии с управляющими сигналами.

В АСУ ТП существует понятие *привод* — это комплекс элементов (часто объединенных конструктивно), обеспечивающих весь процесс управления — от приема управляющего сигнала до воздействия на рабочий орган. Привод может включать в себя усилительные, коммутирующие, преобразовательные, защитные, исполнительные и другие устройства. Но поскольку мы изучаем не конкретные приводы в полном объеме, а их составные элементы и принципы работы, то рассмотрим именно исполнительные механизмы, отражающие основные функции этих устройств.

### 6.1. ВИДЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Краткое определение исполнительного механизма было дано в гл. 3, применительно к АСУ ТП его можно расширить.

*Исполнительные механизмы* — это устройства, осуществляющие перемещение или изменение состояния рабочих органов, воздействующих непосредственно на технологический процесс в соответствии с управляющим сигналом.

Рабочими органами могут быть следующие устройства: вентили, задвижки, заслонки, клапаны, суппорты, каретки, движки реостатов, нагреватели и т. д.

Движение рабочих органов может быть поступательным, поворотным (угол поворота — до  $360^\circ$ ) или вращательным (угол поворота — более  $360^\circ$ ). Изменение состояния может заключаться в их включении или выключении, изменении коэффициента передачи, реверсировании (изменении направления на противоположное) и т. д.

В состав исполнительных механизмов может входить ряд элементов и устройств, обеспечивающих нужные статические и динамические характеристики. Это, например, редуктор и распределительные устройства, управляющие потоком газа или жидкости; исполнительные устройства — электрические, пневматические или гидравлические усилители мощности; датчики состояния, отображающие положение рабочих органов.

Статические и динамические характеристики ИМ определяются:

- величиной и скоростью линейного или углового перемещения;
- развиваемым моментом;
- погрешностью;
- чувствительностью;
- устойчивостью.

В общем случае исполнительные механизмы можно подразделить по виду используемой энергии на электрические, пневматические и гидравлические.

Источником энергии для *электрических* ИМ является, как правило, электрическая сеть с напряжением 220 или 380 В. Однако многие ИМ работают и при напряжении 36 В переменного тока или 12, 24, 27 В постоянного тока (всевозможные электромагнитные реле, пускатели, электромагниты, электродвигатели и т. д.).

*Электрические* ИМ преобразуют электроэнергию в механическую энергию перемещения рабочих органов или энергию их включения-выключения.

Источником энергии *пневматических* ИМ обычно является заводская сеть сжатого воздуха с давлением около  $6 \cdot 10^5$  Па. Однако их питание может осуществляться и от автономных источников, обеспе-

чивающих поступление не только сжатого воздуха, но и других газов при самых различных давлениях, вплоть до  $10^7$  Па. Пневматические ИМ обычно преобразуют энергию сжатого газа в механическую энергию перемещения рабочих органов.

*Гидравлические ИМ* используют энергию находящихся под давлением минеральных масел, спиртоглицериновой смеси или специальных жидкостей. При этом жидкость находится именно под давлением, так как она не сжимаема в отличие от воздуха или газа, которые могут быть сжаты. Давление жидкости может достигать значительной величины, поэтому развиваются огромные усилия при малых габаритных размерах ИМ. Гидравлические ИМ преобразуют энергию жидкости под давлением в энергию перемещения рабочих органов.

Для управления потоком газа или жидкости в пневматических и гидравлических механизмах используются распределительные устройства, приводимые в действие, как правило, за счет электрической энергии. Поэтому исполнительные механизмы подразделяются на электро-механические, электропневматические и электрогидравлические.

По характеру воздействия на технологический процесс ИМ подразделяются на аналоговые (пропорциональные) и дискретные (позиционные).

*Аналоговые ИМ* могут устанавливать рабочий орган в любое промежуточное состояние, пропорциональное величине управляющего сигнала (например, открыть вентиль на 22 % или повернуть заслонку на  $73^\circ$ ).

*Дискретные ИМ* устанавливают рабочий орган только в определенные фиксированные состояния. Например, дискретный сигнал, подаваемый на нагреватель, может включить его в первое, второе или третье состояние либо отключить. Клапан при подаче дискретного сигнала может либо открыть путь жидкости, либо закрыть.

## **6.2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ**

### **6.2.1. Электродвигатели**

Электродвигатель преобразует энергию электромагнитного поля в механическую энергию вращения ротора.

В АСУ ТП используют электродвигатели, выходные характеристики которых определяются величиной управляющего сигнала.

Они получили название исполнительных, или управляемых, электродвигателей и могут быть постоянного тока, переменного тока и шаговыми.

Особенностью исполнительных двигателей в отличие от силовых является то, что они практически никогда не работают в номинальном режиме. Для их работы характерны частые пуски, остановки, реверсы.

Электродвигатели постоянного тока легче управляются, но двигатели переменного тока более надежны, просты и дешевы. Шаговые электродвигатели обеспечивают пошаговое перемещение регулирующих органов.

Основные требования, предъявляемые к исполнительным электродвигателям:

- широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- большой пусковой момент;
- простота регулирования;
- отсутствие «самохода», т.е. способность двигателя останавливаться сразу же после снятия сигнала управления;
- возможность реверсирования;
- высокое быстродействие;
- большая мощность при малых габаритных размерах.

Первыми появились двигатели постоянного тока. В 30-х гг. XIX в. русский ученый Б. С. Якоби построил действующий электродвигатель, основные элементы которого сохранились до настоящего времени.

Он стал основным исполнительным двигателем приводов, требующих плавного регулирования скорости вращения в широком диапазоне.

В конце XIX в. М. О. Доливо-Добровольский предложил конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором, ставшего основой асинхронных исполнительных приводов.

**Электродвигатели постоянного тока.** Электродвигатель постоянного тока (рис. 6.1, а) состоит из статора с полюсами, на которых размещена обмотка возбуждения, якоря с обмоткой и коллектора с щетками.

В качестве исполнительных электродвигателей малой мощности широкое применение нашли магнитоэлектрические двигатели, магнитное поле которых создается за счет постоянных магнитов (двигатели серии ДПМ и ДПР) (рис. 6.1, б).

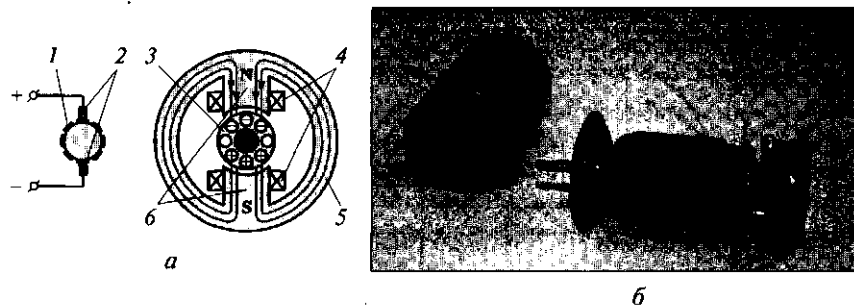


Рис. 6.1. Электродвигатель постоянного тока:  
*a* — конструкция: 1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — якорь с обмоткой; 4 — обмотки возбуждения; 5 — статор; 6 — полюсы; *б* — общий вид

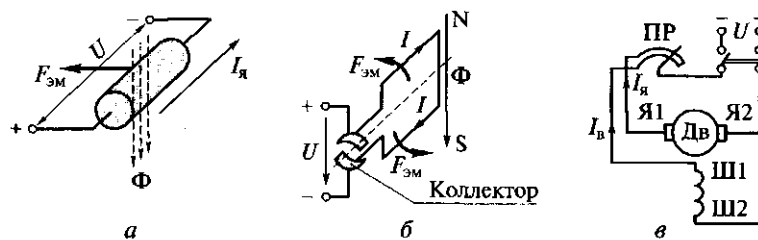


Рис. 6.2. Принцип работы [*a*, *б*] и схема включения [*в*] магнитоэлектрических двигателей

Обмотки полюсов двигателя служат для создания постоянного магнитного поля, в котором вращается якорь. Если к обмотке якоря приложить напряжение  $U$ , то в ней потечет ток  $I_{я}$  (рис. 6.2, *a*). Взаимодействие тока и магнитного поля создаст электромагнитную силу, которая заставит якорь двигаться. Как только он начнет вращаться (пересекать магнитное поле), в его обмотках наведется ЭДС  $e_{я}$ , создающая ток, направленный навстречу току от приложенного напряжения. В результате ток в якоря будет определяться разностью между напряжением питания и наведенной ЭДС:

$$I_{я} = (U - e_{я}) / R_{я}, \quad (6.1)$$

где  $R_{я}$  — сопротивление обмотки якоря.

Коллектор в электродвигателях постоянного тока служит для преобразования постоянного напряжения, подводимого к щеткам, в переменное напряжение в обмотке якоря, что позволяет сохранить неизменным его направление вращения (рис. 6.2, *б*).

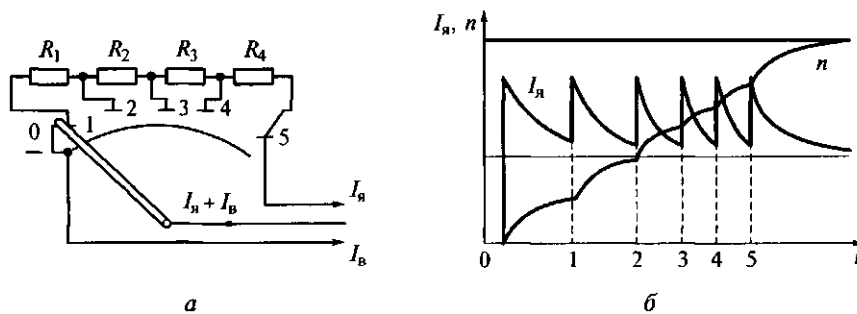


Рис. 6.3. Пусковой реостат (а) и токи в обмотках (б) при разгоне двигателя

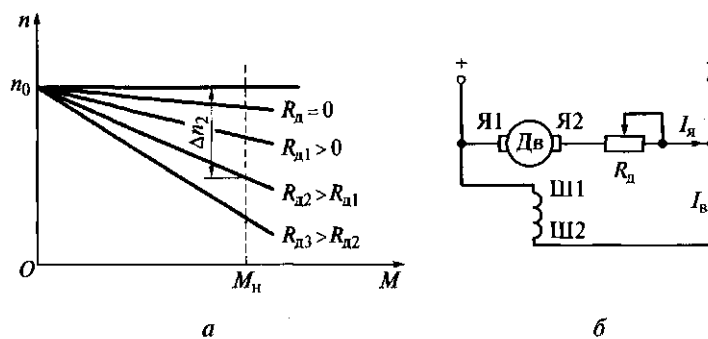


Рис. 6.4. Частота вращения (а) двигателя и реостатное регулирование (б)

В момент пуска, когда  $e_a = 0$ , ток якоря может достигать значительной величины (см. формулу (6.1)), что требует применения в схеме пускового реостата (ПР), включаемого последовательно с якорной обмоткой Я1 — Я2 (рис. 6.2, в). По мере разгона двигателя сопротивление пускового реостата уменьшается до нуля (рис. 6.3, а). Ток  $I_a$  в обмотке возбуждения Ш1 — Ш2 остается неизменным; при этом ток якоря  $I_a$  и частота вращения  $n$  достигают установившихся значений (рис. 6.3, б).

Двигатель постоянного тока обладает «жесткой» механической характеристикой (зависимостью частоты вращения от момента нагрузки), т. е. при увеличении нагрузки частота вращения уменьшается незначительно (рис. 6.4, а, прямая  $R_a = 0$ ).

Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока возможно за счет:

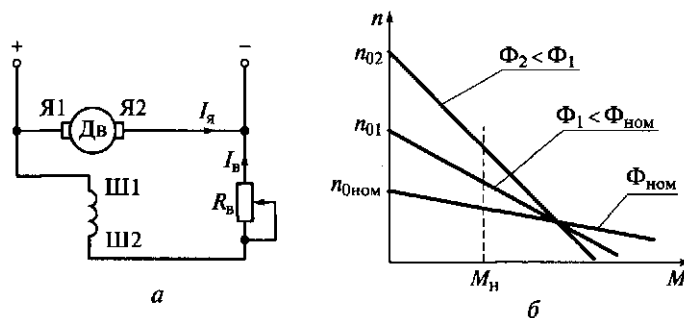


Рис. 6.5. Полюсное регулирование (а) и графики частоты вращения (б) двигателя

- изменения сопротивления  $R_d$  в цепи якоря — *реостатное регулирование* (рис. 6.4, б). При этом частота вращения двигателя без нагрузки  $n_0$  остается неизменной, а с появлением момента нагрузки  $M_n$  на валу изменяется в широком диапазоне (см. рис. 6.4, а);
- изменения тока в обмотках возбуждения — *полюсное регулирование* (рис. 6.5, а) путем изменения сопротивления  $R_b$  в цепи возбуждения. При этом изменяется частота вращения как без нагрузки, так и с нагрузкой (рис. 6.5, б). Полюсное регулирование является экономичным, поскольку управление магнитным потоком возбуждения осуществляется за счет изменения тока возбуждения  $I_b$ , величина которого невелика;
- изменения напряжения питания  $U_j$  якорной обмотки — *якорное регулирование* (рис. 6.6, а). При этом поток возбуждения должен оставаться неизменным. Это должны быть двигатели с независимым, параллельным возбуждением или магнитоэлектрические двигатели. Частота вращения двигателя практически линейно зависит от напряжения питания якорной обмотки  $U_j$  (рис. 6.6, б).

Широкое применение в качестве исполнительных нашли двигатели постоянного тока с независимым возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов.

При *независимом возбуждении* в качестве обмотки управления используется либо обмотка якоря — *якорное регулирование* (рис. 6.7, а), либо обмотка полюсов — *полюсное регулирование* (рис. 6.7, б).

В первом случае обмотка полюсов всегда подключена к источнику постоянного напряжения и является обмоткой возбуждения. На

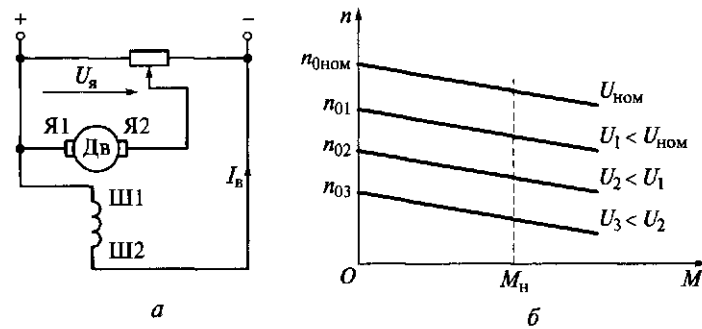


Рис. 6.6. Якорное регулирование (а) и графики частоты вращения (б) двигателя

обмотку якоря сигнал с усилителя мощности подается лишь тогда, когда необходимо вращение якоря. Во втором случае к источнику постоянного напряжения всегда подключена обмотка якоря, которая выполняет роль обмотки возбуждения. Управляющей обмоткой является обмотка полюсов. Для ограничения пусковых токов в якорной обмотке во время переходных режимов последовательно с ней включается балластное сопротивление  $R_6$ .

В двигателях с возбуждением от постоянных магнитов управляющей обмоткой всегда является обмотка якоря, т. е. такие двигатели всегда работают с якорным регулированием (рис. 6.7, в).

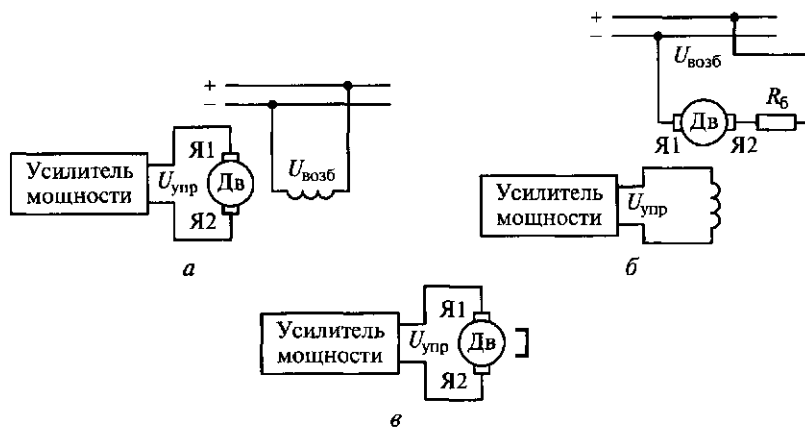


Рис. 6.7. Независимое возбуждение двигателя (а, б) и возбуждение от постоянных магнитов (в)



Основными преимуществами исполнительных двигателей постоянного тока являются возможность плавного регулирования их частоты вращения от нуля до максимального значения, высокий пусковой момент и высокое быстродействие.

Основными недостатками двигателей постоянного тока являются невысокая надежность и недолговечность из-за наличия коллектора и щеток, которые могут истираться, забиваться пылью и продуктами износа, а также искрить.

**Электродвигатели переменного тока.** Электродвигатели переменного тока могут быть асинхронными и синхронными.

Асинхронные двигатели по сравнению с машинами постоянного тока более надежны и долговечны, просты конструктивно и в обслуживании, имеют более широкий диапазон мощностей.

Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами, наводимыми в обмотках ротора этим полем. Помещенный во вращающееся магнитное поле ротор с обмоткой начинает вращаться в направлении магнитного поля.

Однако догнать поле ротор не может, так как в противном случае поток перестанет пересекать обмотку и в ней не будет наводиться ЭДС, а следовательно, ток и электромагнитный момент будут равны нулю.

Таким образом, в асинхронной машине всегда частота вращения ротора  $n$  меньше частоты вращения магнитного поля  $n_1$ .

Величина  $S = (n_1 - n)/n_1$  называется скольжением в асинхронной машине и для электродвигателя с короткозамкнутым ротором находится в пределах 2...7%, т. е. асинхронная машина имеет «жесткую» механическую характеристику.

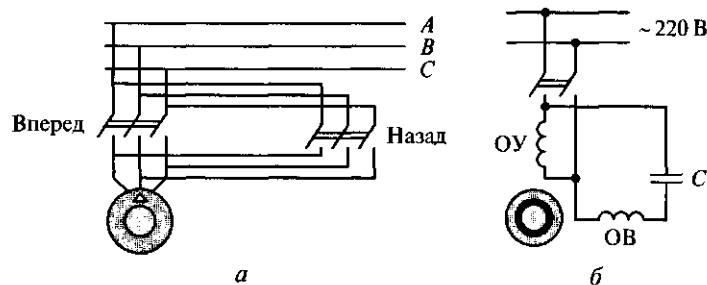


Рис. 6.8. Схемы включения трехфазного (а) и двухфазного (б) асинхронных двигателей

Реверсирование в трехфазном асинхронном двигателе осуществляется за счет изменения направления вращения магнитного поля, которое, в свою очередь, определяется порядком чередования фаз: прямой ( $A, B, C$ ) или обратный ( $A, C, B$ ) (рис. 6.8, *a*).

В АСУ ТП широко применяются и двухфазные асинхронные двигатели. Они имеют на статоре две обмотки: обмотку управления (ОУ) и обмотку возбуждения (ОВ), сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$  и питаемые токами, сдвинутыми по фазе в идеальном случае также на  $90^\circ$ . Это позволяет получить вращающееся магнитное поле, поэтому принцип работы двухфазного асинхронного двигателя аналогичен принципу работы трехфазной машины. Обе обмотки статора могут питаться от одной и той же сети, но в одну из обмоток — обмотку возбуждения — включается конденсатор  $C$ , что позволяет сдвинуть токи в обмотках по фазе. Такой двигатель называется конденсаторным (рис. 6.8, *б*).

Ротор двухфазных машин, используемых в качестве исполнительных двигателей, чаще выполняется в виде полого алюминиевого стаканчика.

Двигатель с полым ротором (рис. 6.9, *a*) имеет внутренний 5 и внешний 2 статоры из наборного железа, расположенные на корпусе 1. На внешнем статоре размещаются две обмотки 3, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Внутренний статор служит для уменьшения сопротивления магнитному потоку. Между статорами на оси 4 вращается алюминиевый тонкостенный стаканчик — ротор 6 (толщина стенок — 0,1 ... 1,0 мм.)

Работа двигателя с полым ротором основана на взаимодействии вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с вихревыми токами, наводимыми этим полем в алюминиевом стаканчике. Момент инерции полого ротора мал, поэтому быстродействие двигателя велико.

Большое активное сопротивление тонкостенного стаканчика и «мягкая» механическая характеристика  $n = f(M_n)$  двигателя с полым ротором позволяют уменьшать частоту вращения ротора за счет изменения подводимого напряжения  $U_{упр}$  (рис. 6.9, *б*) от максимальной (синхронной) почти до нуля. Такое управление называется *амплитудным*.

Если напряжение питания обмоток оставить неизменным, а изменять угол сдвига фаз между токами в обмотках с помощью фазосдвигающей цепочки, то частота вращения ротора тоже будет изменяться; такое управление называется *фазовым*.

Можно изменять и амплитуду управляющего напряжения, и фазу — это *амплитудно-фазовое управление*.

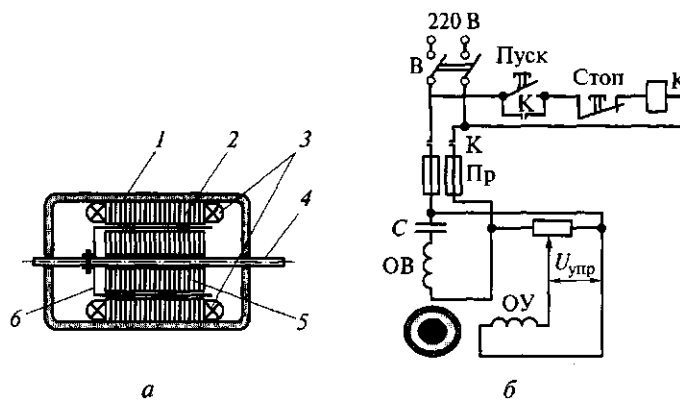
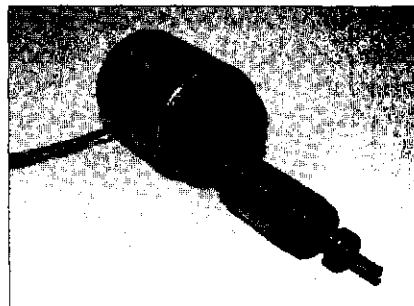


Рис. 6.9. Двигатель с полым ротором (а) и схема управления и пуска асинхронного двигателя (б):

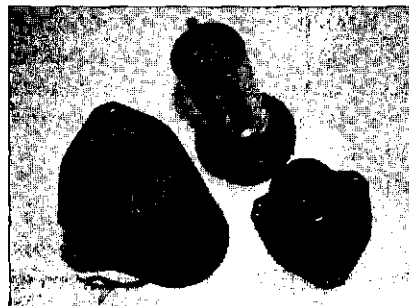
1 — корпус; 2 — внешний статор; 3 — обмотки; 4 — ось; 5 — внутренний статор; 6 — ротор

Двухфазный двигатель с одним из рассмотренных способов управления частотой вращения может использоваться в качестве исполнительного, в то время как трехфазные асинхронные двигатели применяют в качестве силовых.

На рис. 6.9, б приведена также схема пуска асинхронного двигателя. После срабатывания выключателя В нажимается кнопка «Пуск» и по обмотке контактора К течет ток. Контактор срабатывает и замыкает контакты цепи питания обмоток статора, а также контакты, блокирующие кнопку «Пуск». Для остановки двигателя необходимо нажать кнопку «Стоп», которая разрывает цепь питания обмотки



а



б

Рис. 6.10. Двигатели с короткозамкнутым (а) и полым (б) роторами

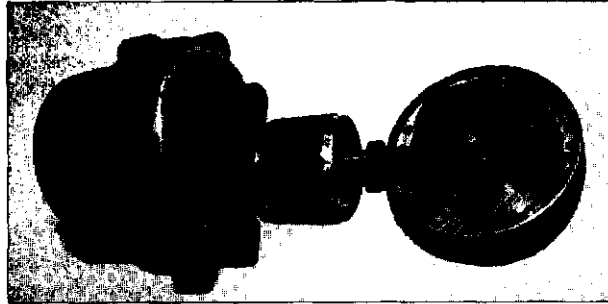


Рис. 6.11. Двигатель с встроенным редуктором (мотор-редуктор)

контактора, и тот разрывает цепь обмоток статора и разблокирует контакты, включенные параллельно кнопке «Пуск».

На рис. 6.10, а представлен двигатель с короткозамкнутым ротором, а на рис. 6.10, б — двигатель с полым ротором.

Так как частота вращения асинхронного двигателя определяется частотой сети и обычно составляет около 3 000 об/мин, в конструкцию исполнительного механизма обычно вводится редуктор. Это позволяет получить приемлемые скорости перемещения рабочих органов.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и редуктором, называемый также мотор-редуктором, представлен на рис. 6.11.

*Синхронные двигатели* — это электрические машины, частота вращения ротора  $n$  которых равна частоте вращения магнитного поля  $n_1$ , создаваемого обмоткой статора.

В основе работы синхронного двигателя лежит взаимодействие вращающегося магнитного поля статора с постоянным магнитным полем ротора.

Статор 1 синхронного двигателя (рис. 6.12) ничем не отличается от статора асинхронного и имеет обмотки 5, служащие для создания вращающегося магнитного поля. Ротор синхронной машины 6 имеет обмотку 4, выполненную

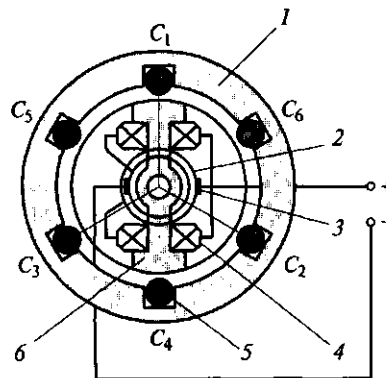


Рис. 6.12. Устройство синхронного двигателя:

1 — статор; 2 — контактные кольца; 3 — щетки; 4, 5 — обмотки; 6 — ротор

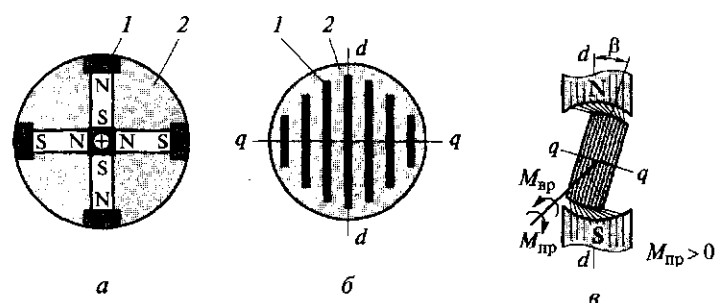


Рис. 6.13. Роторы гистерезисного (а) и реактивных (б, в) двигателей:  
1 — сталь; 2 — алюминий

изолированным проводом и питаемую постоянным током через контактные кольца 2 и щетки 3. Основное назначение обмоток ротора — создание постоянного магнитного поля.

В процессе работы происходит взаимодействие внешнего и внутреннего магнитных полей: вращающееся внешнее поле за счет «сцепления» магнитных полей увлекает за собой ротор, причем угловые скорости вращения внутреннего и внешнего полей оказываются одинаковыми.

Питание обмотки ротора постоянным током имеет два недостатка: необходим источник постоянного напряжения; контактное устройство (кольца со щетками) снижает надежность.

Этих недостатков лишены электродвигатели, в которых вместо электромагнита в роторе используется постоянный магнит с высокой коэрцитивной силой. Такие двигатели называются *гистерезисными*. В их роторах магниты заливаются алюминием, образуя сплошной цилиндр (рис. 6.13, а). Алюминий играет роль пусковой обмотки, в которой под действием вращающегося магнитного поля наводятся вихревые токи. Под действием этих токов ротор приходит во вращение аналогично полуму ротору асинхронного двигателя. Мощность таких машин небольшая — до 300 Вт.

Широко применяются в качестве машин малой мощности также *реактивные электродвигатели*. В них источник постоянного магнитного поля на роторе отсутствует. Его вращение обеспечивается особой формой ротора (рис. 6.13, б, в) и «упругостью» магнитных силовых линий, которая заставляет ротор при отсутствии нагрузки располагаться по оси полюсов статора и вращаться синхронно с полем статора. При наличии нагрузки ротор отстает от оси полюсов на

угол  $\beta$ , но продолжает вращаться с синхронной скоростью (т. е. с той же скоростью, что и магнитное поле).

В роторе, представленном на рис. 6.13, б, стальные полосы 1 залиты алюминием 2, а на рис. 6.13, в ротор выполнен в виде скошенного по бокам цилиндра из ферромагнитного материала. В обоих случаях намагниченность по оси  $d-d$  обеспечивается значительно легче, чем по оси  $q-q$ .

Схемы включения обмоток статора синхронного и асинхронного двигателей аналогичны, поскольку в обоих случаях статор служит для создания вращающегося магнитного поля.

Основное применение синхронные двигатели нашли в устройствах, в которых необходимо поддерживать неизменной скорость вращения основных узлов: в лентопротяжных механизмах, самопишущих и регистрирующих приборах, электромагнитных муфтах.

**Шаговые электродвигатели.** Цифровая форма представления сигналов управления в ЭВМ привела к созданию нового типа двигателей — шаговых, которые непосредственно преобразуют управляющий сигнал в виде последовательности импульсов в фиксированный угол поворота вала или линейное перемещение.

В основе работы шаговых двигателей лежит стремление магнитного потока замыкаться по пути наименьшего сопротивления. В них статор и ротор, выполненные из ферромагнитного материала, имеют направленные друг к другу прямоугольные выступы (полюсы), расположенные равномерно (рис. 6.14, а). Число полюсов на статоре и роторе одинаково и достаточно велико — от десятков до 200 и более. Статор состоит из трех секций, расположенных вплотную друг к другу, на которых размещены отдельные обмотки. Полюсы всех

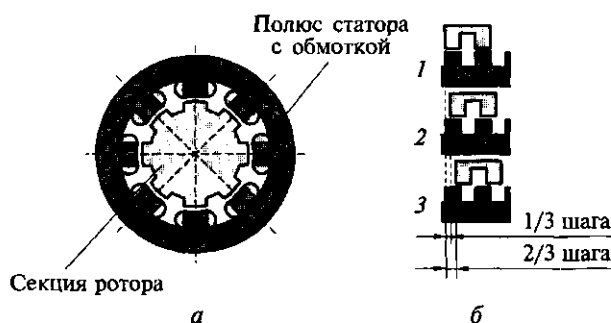


Рис. 6.14. Шаговый электродвигатель (а) и варианты {1...3} взаимного расположения полюсов статора и ротора (б)

секций статора совмещены. Обмотки секций включаются в систему управления независимо друг от друга. Ротор также состоит из трех секций, расположенных на одном валу, но полюсы второй секции смещены относительно полюсов первой секции на  $1/3$  шага полюсов, а третьей секции — на  $2/3$  шага.

Если выступ ротора находится под выступом статора (рис. 6.14, б, положение 1), то магнитное сопротивление цепи статор— ротор наименьшее. При подаче напряжения в обмотку статора этой секции ротор остается неподвижным. Если же напряжение подать в обмотку статора соседней секции, то ротор поворачивается на  $1/3$  шага полюсов (см. рис. 6.14, б, положение 2), т. е. до тех пор, пока полюс ротора не окажется под полюсом статора. Если подать напряжение в обмотку следующей секции, то произойдет поворот еще на  $1/3$  шага (см. рис. 6.14, б, положение 3) и т. д.

Таким образом, угол поворота ротора будет определяться количеством последовательно подаваемых в обмотки импульсов, а скорость поворота — частотой этих импульсов. Точность углового перемещения в шаговых двигателях достигает  $0,5^\circ$ , а частота — более 1 000 шагов в секунду. Реверс обеспечивается за счет смены последовательности подачи импульсов в секции статора.

Широкое применение шаговые двигатели нашли в качестве исполнительных для перемещения рабочих органов в металлорежущих станках, причем их мощность может находиться в диапазоне от единиц до сотен ватт. Если же мощность недостаточная, то применяется агрегат из шагового двигателя с гидроусилителем.

Основными достоинствами шаговых двигателей являются работа непосредственно от дискретных сигналов ЭВМ без их преобразования, высокая точность позиционирования, надежность, простота и долговечность; основными недостатками — невысокие КПД и мощность.

## 6.2.2. Электромагнитные муфты

*Муфта* — это устройство, передающее вращательное движение от одного вала к другому.

Существуют неуправляемые муфты, обеспечивающие постоянное сцепление валов, и управляемые, которые передают движение от ведущего вала к ведомому по сигналам управления.

Электромагнитная муфта представляет собой устройство с двумя валами: ведущим, приводимым в действие любым двигателем, и ведомым, непосредственно связанным с рабочими органами. На

валах имеются элементы сцепления, через которые и передается вращение.

В управляемой электромагнитной муфте передача вращения обеспечивается посредством ферромагнитных материалов.

Управляемые муфты могут быть:

- дискретного действия, в которых при подаче сигнала управления осуществляется жесткое сцепление валов;
- пропорциональные, в которых скорость вращения ведомого вала определяется величиной сигнала управления.

*Муфта дискретного действия* (рис. 6.15, а) состоит из ферромагнитного сердечника с катушкой на ведущем валу и ферромагнитного диска на ведомом валу. При подаче в катушку сигнала управления под действием магнитного потока создается электромагнитная сила, которая перемещает ферромагнитный диск по оси до соприкосновения с ферромагнитным сердечником. Затем за счет сил сцепления диск и ведомый вал приходят во вращение со скоростью, равной скорости вращения ведущего вала.

При снятии сигнала управления ферромагнитный диск под действием пружины расцепляется с продолжающим вращаться сердечником и ведомый вал останавливается. Для уменьшения влияния остаточной магнитной индукции при снятом сигнале управления на сердечнике размещается немагнитная прокладка (например, медная).

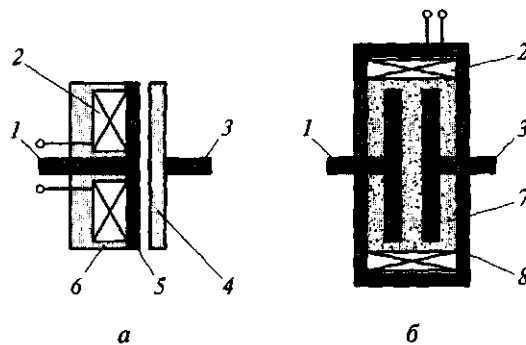


Рис. 6.15. Муфты с ферромагнитными материалами:

а — дискретного действия; б — пропорциональная; 1 — ведущий вал; 2 — катушка; 3 — ведомый вал; 4 — ферромагнитный диск; 5 — прокладка; 6 — сердечник; 7 — ферромагнитная масса; 8 — корпус



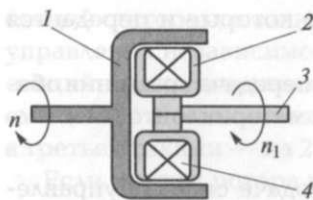


Рис. 6.16. Пропорциональная муфта с вращающимся магнитным полем:

1 — ведомый вал; 2 — индуктор; 3 — ведущий вал; 4 — катушка с током

Такие муфты могут быть реверсивными и неревверсивными. Передаваемая муфтой мощность находится в диапазоне от единиц ватт до нескольких киловатт; время срабатывания — от 2 до 20 мс.

В пропорциональной муфте (рис. 6.15, б) диски помещены в корпус, заполненный масляной ферромагнитной массой — порошком карбонильного железа с тальком. Попадая в магнитное поле, создаваемое катушкой, ферромагнитная масса увеличивает свою вязкость и плотно соединяет полумуфту ведущего вала с полумуфтой ведомого вала.

Вязкость ферромагнитной массы растет по мере увеличения магнитного поля, т. е. величины тока в катушке. Следовательно, скорость вращения ведомого вала зависит от тока в обмотке при постоянной скорости ведущего вала. Присутствие талька в карбонильном железе аналогично немагнитной прокладке в муфтах дискретного действия: тальк обволакивает каждую частичку порошкообразного железа, помогая им легче распасться при снятии управляющего напряжения.

Пропорциональные муфты применяют в системах управления совместно с синхронным электродвигателем.

Еще одна схема пропорциональной муфты, работающей по принципу асинхронного двигателя, приведена на рис. 6.16.

Если частота вращения ведущего вала с индуктором равна  $n_1$ , то ведомый вал может вращаться с частотой  $n$ , немного меньшей  $n_1$ , подобно тому, как ротор асинхронного двигателя вращается, увлекаемый вращающимся магнитным полем. При этом частота вращения ведомого вала при работе с нагрузкой определяется величиной тока в катушке индуктора.

Основными достоинствами электромагнитных муфт являются:

- высокое быстродействие;
- плавный пуск и регулирование частоты вращения;
- простота управления;
- большой диапазон мощностей;
- высокая надежность;
- долговечность.

### 6.2.3. Электромагниты и реле

*Электромагниты* — это электромеханические устройства, преобразующие двоичные управляющие сигналы в фиксированное линейное или угловое перемещение рабочих органов.

Они широко используются в АСУ ТП для открытия и закрытия клапанов, заслонок и вентилях, а также в коммутационных устройствах (реле, контакторы, пускатели). Они применяются в распределительных устройствах пневмо- и гидроприводов для управления потоком газа или жидкости, электромагнитных муфтах, устройствах защиты (тепловое или токовое реле, автоматические предохранители).

Электромагниты (рис. 6.17) могут быть постоянного и переменного тока с управляющим напряжением от 6 до 220 В и развиваемым усилием от долей до десятков и сотен ньютонов; они бывают удерживающие и приводные, дроссельного и соленоидного типа.

На рис. 6.18 представлены основные типы электромагнитов, используемых для управления распределительными устройствами пневмо- и гидроприводов.

При подаче тока в катушку 1 создается электромагнитная сила, под действием которой якорь 3 поворачивается (рис. 6.18, а, в) или

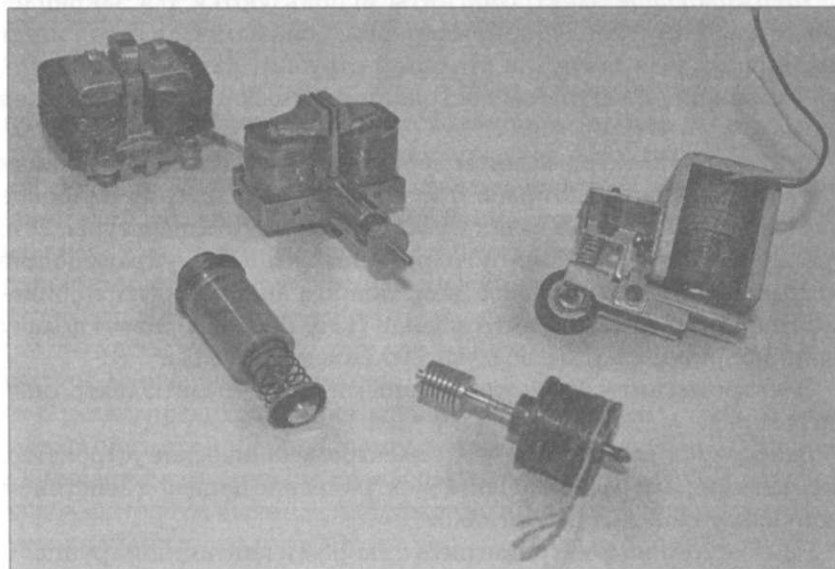


Рис. 6.17. Электромагниты

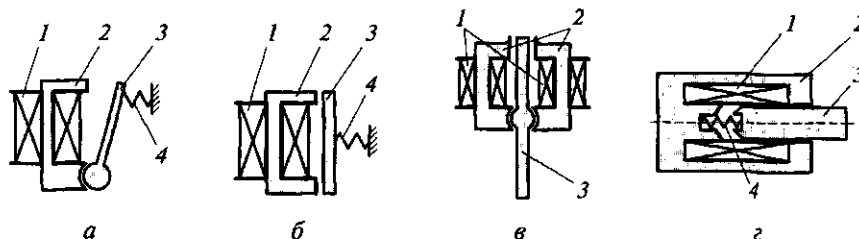


Рис. 6.18. Устройство электромагнитов:

а — поворотного; б — с поступательным движением якоря; в — поворотного с дифференциальной магнитной схемой; г — соленоидного типа; 1 — катушка; 2 — сердечник; 3 — якорь; 4 — пружина

перемещается (рис. 6.18, б, г) в направлении сердечника 2. При этом преодолевается сила противодействующей пружины 4. При снятии тока якорь возвращается в исходное состояние под действием пружины. На рис. 6.18, в показана дифференциальная конструкция поворотного электромагнита, обеспечивающая поворот якоря по часовой или против часовой стрелки при подаче тока в правую или левую катушку, а на рис. 6.18, г — конструкция соленоидного электромагнита с конической формой воздушного зазора, что позволяет повысить развиваемое электромагнитом усилие.

*Удерживающие* электромагниты используются для закрепления деталей на станках (например, шлифовальных), в подъемных механизмах (для погрузки стальной стружки или металлолома), для удержания в закрытом состоянии входных дверей подъездов в домах.

*Приводные* электромагниты перемещают рукоятки управления станками, обеспечивают работу электромагнитных муфт. Широкое применение они нашли в составе пневмо- и гидроаппаратуры. Это, в первую очередь, пневмо- и гидрозлектроклапаны, управляющие расходом газа и жидкости соответственно в пневмо- и гидроприводах. Например, пневмоэлектроклапан ПЭК-47 обеспечивает подачу в пневмопривод сжатого воздуха давлением  $47 \cdot 10^5$  Па.

Электромагниты являются главными элементами электромагнитных реле.

*Электромагнитные реле* — это электромеханические устройства, замыкающие или размыкающие электрические цепи под действием двоичных управляющих сигналов.

Реле состоит из электромагнита с якорем и контактной группы, в которую входит одна или несколько пар контактов. Якорь, перемещаясь, воздействует на контакты, коммутируя цепи нагрузки реле.

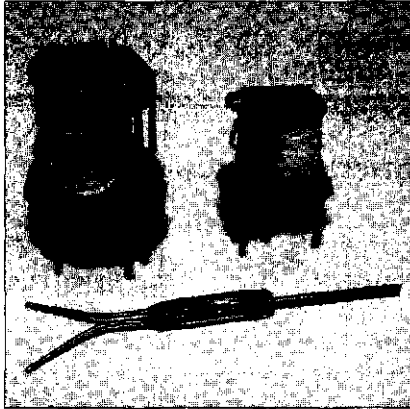


Рис. 6.19. Реле

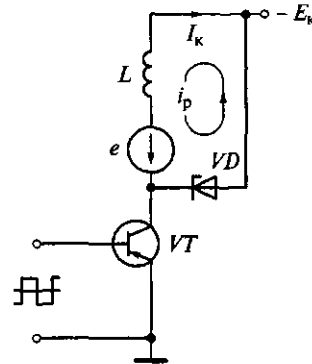


Рис. 6.20. Схема управления электромагнитом

При незначительной мощности сигнала управления, подаваемого в обмотку реле, оно способно управлять значительной мощностью в цепи нагрузки. Таким образом, электромагнитное реле можно рассматривать как усилительный элемент, причем с коэффициентом усиления в сотни тысяч раз.

Ассортимент реле очень широк. Они могут быть постоянного и переменного тока, иметь всего два контакта или несколько десятков контактов (рис. 6.19).

Управляются электромагниты и реле, как правило, с помощью транзисторов, работающих в ключевом режиме (рис. 6.20).

Обмотка электромагнита  $L$  включается в коллекторную цепь транзистора  $VT$ . При подаче на базу транзистора прямоугольного открывающего импульса по обмотке электромагнита течет максимальный ток, обеспечивающий срабатывание реле. При закрытии транзистора ток в обмотке практически мгновенно падает до нуля. Это вызывает появление значительной ЭДС самоиндукции  $e$ , препятствующей падению тока и увеличивающей напряжение на коллекторе до опасного значения.

С целью предохранения транзистора от выхода из строя обмотку электромагнита шунтируют диодом или стабилитроном  $VD$  с напряжением стабилизации, не превышающим допустимого напряжения на коллекторе за вычетом напряжения питания. В этом случае ЭДС самоиндукции «разряжается» через стабилитрон, обеспечивая протекание тока разряда  $i_p$  и ограничивая величину напряжения на коллекторе транзистора.

**6.3.1. Электропневматические исполнительные механизмы**

Если от исполнительного механизма требуются высокое быстродействие и значительная мощность, а также возвратно-поступательное движение, то целесообразно использовать электропневматические ИМ. Они состоят из распределительного устройства, управляющего электромагнита и силового цилиндра с поршнем.

Распределительное устройство, приводимое в действие управляющим электромагнитом, направляет поток воздуха в ту или иную полость цилиндра или изменяет величину давления в полости. При этом шток, соединенный с поршнем, перемещается в соответствующем направлении, управляя положением рабочих органов.

В качестве распределительных устройств в пневматических механизмах используются золотники, струйная трубка и сопло-заслонка.

Устройство исполнительного механизма с золотниковым распределителем и электромагнитом соленоидного типа показано на рис. 6.21. При отсутствии тока в обмотке электромагнита золотник 1, связанный с сердечником, под действием пружины плотно прижимается к седлу 3 и поток газа от пневмосети не может поступать в пневмоцилиндр (рис. 6.21, а).

При подаче управляющего сигнала в обмотку 4 электромагнита в ней появляется ток  $I_y$ , под действием которого возникает электромагнитная сила, стремящаяся втянуть сердечник 5 внутрь катушки. Золотник перемещается и плотно прижимается к седлу 2, открывая путь газу через седло 3. Поток газа устремляется через открытый золотник в цилиндр, создавая давление на поршень 9. Поршень перемещается, сжимая цилиндрическую пружину 7 и передавая через шток 8 усилие нагрузке (рис. 6.21, б). При снятии сигнала управления сердечник под действием пружины возвращается в исходное состояние, перекрывая путь газу в цилиндр и соединяя полость цилиндра через седло 2 с атмосферой. Поршень под действием пружины возвращается в исходное состояние.

На рис. 6.22 представлено устройство электропневматических исполнительных механизмов с распределительными устройствами типа *струйная трубка* и *сопло-заслонка*.

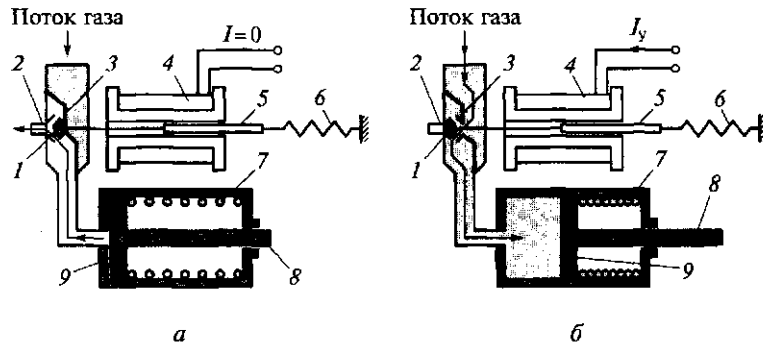


Рис. 6.21. Исполнительный механизм с золотниковым распределителем:  
 а — с закрытым клапаном; б — с открытым клапаном; 1 — золотник; 2, 3 — седло; 4 — обмотка; 5 — сердечник; 6, 7 — пружины; 8 — шток; 9 — поршень

В первом случае (рис. 6.22, а) струйная трубка 1, управляемая поворотным электромагнитом, направляет поток газа от пневмосети в левую (направление Л) или правую (П) полость цилиндра и соединяет соответственно правую или левую полость с атмосферой. Поршень со штоком перемещается в сторону меньшего давления, передавая усилие на нагрузку.

Во втором случае (рис. 6.22, б) заслонка, управляемая аналогичным электромагнитом, перекрывает левое или правое сопло, поднимая давление в соответствующей полости цилиндра и соединяя противоположную полость с атмосферой. Поршень перемещается в сторону меньшего давления, соответственно воздействуя на нагрузку.

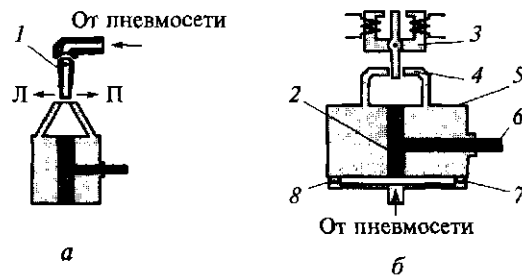


Рис. 6.22. Исполнительные механизмы со струйной трубкой (а) и соплом-заслонкой (б):

1 — струйная трубка; 2 — поршень; 3 — электромагнит; 4 — сопло; 5 — цилиндр; 6 — шток; 7, 8 — дроссели

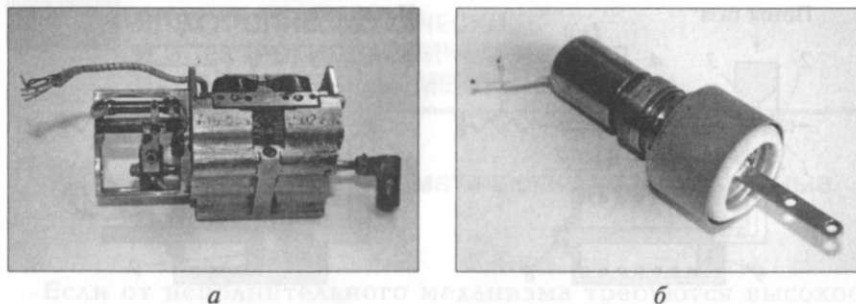


Рис. 6.23. Пневмоприводы с распределительными устройствами:  
*а* — типа сопло-заслонка; *б* — золотникового типа

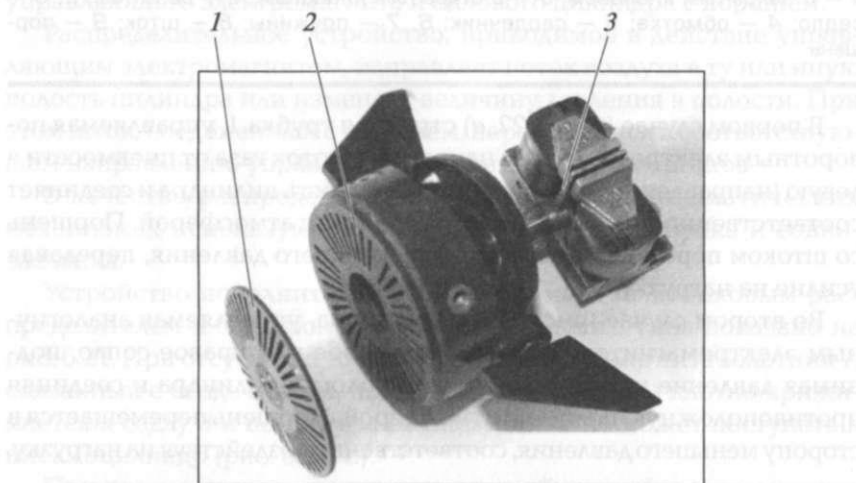


Рис. 6.24. Пневмопривод со струйным распределителем:  
 1 — струйная решетка; 2 — приемная решетка; 3 — электромагнит

Поток газа от пневмосети поступает в полости через дроссели, обеспечивающие необходимый перепад давления в них.

Конструкции дроссельных, струйных и золотниковых распределителей могут быть самыми разными. На рис. 6.23, 6.24 показаны некоторые конструктивные решения электропневматических ИМ. В исполнительном механизме, представленном на рис. 6.24, роль струйной трубки выполняет струйная решетка 1, через которую в ИМ поступает поток воздуха. Электромагнит 3 поворачивает эту решетку на небольшой угол влево или вправо. В результате прошедший через

решетку поток направляется или в левую группу щелей приемной решетки 2 (правая группа щелей при этом закрыта решеткой 1), или в правую группу щелей решетки 2 (левая группа закрыта решеткой 1). Таким образом, поток воздуха в зависимости от управляющего сигнала, поступившего на электромагнит 3, направляется или в левую, или в правую полость ИМ, соответственно изменяя положение рабочего органа.

Основными недостатками электропневматических исполнительных механизмов являются повышенный шум при работе, поскольку отработанный воздух или газ выпускается непосредственно в атмосферу, и невысокая точность выполнения заданных управляющих воздействий из-за способности газа сжиматься. Кроме того, использование высокого давления в цилиндре создает определенную опасность: при малейших его дефектах возможны разрыв и разрушение цилиндра.

### 6.3.2. Электрогидравлические исполнительные механизмы

Электрогидравлические ИМ во многом аналогичны электропневматическим. Они также имеют аналогичные распределительные устройства, управляющие электромагниты и поршневую систему; разница лишь в рабочей среде (в гидроприводе — это жидкость под высоким давлением). В отличие от электропневматических электрогидравлические ИМ обладают высокой точностью, высокой чувствительностью, малыми габаритными размерами, большой мощностью, бесшумностью и безопасностью. Вместе с тем электрогидравлические ИМ имеют более низкое быстродействие и сложную конструкцию.

Использование в качестве рабочей среды несжимаемой жидкости делает электрогидравлические механизмы безопасными в эксплуатации, в том числе при сверхвысоких давлениях. Широкое применение они нашли в манипуляторах роботов.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение исполнительного механизма.
2. Как классифицируются исполнительные механизмы по виду используемой энергии?
3. Расскажите об источниках энергии для исполнительных механизмов.



4. Как воздействуют на технологический процесс аналоговые и дискретные ИМ?
5. Перечислите основные требования, предъявляемые к исполнительным электродвигателям.
6. Назовите три способа регулирования частоты вращения в электродвигателях постоянного тока.
7. Какое регулирование используется в двигателях постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов?
8. Какой тип асинхронных электродвигателей используется в качестве исполнительных?
9. Назовите три основные схемы управления частотой вращения асинхронных исполнительных электродвигателей.
10. Какие основные конструктивные схемы роторов применяются в синхронных машинах малой мощности?
11. Где применяются синхронные машины малой мощности?
12. В чем особенность работы шаговых двигателей?
13. Дайте определение муфты.
14. Как работает муфта дискретного действия?
15. Каков принцип работы муфты пропорционального действия?
16. Что такое электромагниты и где они используются?
17. Что такое электромагнитные реле и где они используются?
18. Назовите состав электропневматических исполнительных механизмов.
19. Поясните принцип работы электропневматических исполнительных механизмов.
20. Назовите основные отличия электрогидравлических исполнительных механизмов от электропневматических.

## **УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

Как указывалось в гл. 3, управление — это формирование воздействий на объект в соответствии с заданным алгоритмом. При управлении технологическим процессом речь идет о воздействии на технологическое оборудование. Воздействие реализуется путем подачи управляющих сигналов на исполнительные механизмы. Следовательно, функция управляющего устройства заключается в формировании управляющих сигналов в соответствии с заданным алгоритмом.

Применительно к задачам управления алгоритмы управления можно подразделить на две группы: безвариантные и с выбором варианта действий. Первую группу составляют линейные алгоритмы, в которых задается жесткая последовательность действий независимо от каких бы то ни было внешних факторов. Такие алгоритмы реализуются управляющими устройствами с «жесткой» логикой.

Во вторую группу входят алгоритмы с ветвлением и циклические алгоритмы. Для их реализации требуются более сложные управляющие устройства, способные анализировать ситуацию и выбирать вариант продолжения действий, зависящий от выполнения поставленного условия. Создание таких устройств стало возможным с появлением средств вычислительной техники и внедрением их в системы управления. В зависимости от уровня, на котором происходит анализ и выбор решения, эти устройства подразделяются на несколько типов, рассмотренных далее.

### **7.1. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ С «ЖЕСТКОЙ» ЛОГИКОЙ**

#### **7.1.1. Линейные процессы**

Приведем несколько примеров процессов, которые могут быть описаны линейными алгоритмами (их можно назвать линейными процессами):

- работа светофора: включение первой группы ламп (зеленый и красный свет) на определенное время, мигающий режим в течение заданного времени, переключение на вторую группу ламп (желтый свет), переключение на третью группу ламп (красный и зеленый свет), мигающий режим и т. д.;
- движение лифта в многоэтажном доме: открытие дверей, выдержка интервала времени, закрытие дверей, включение двигателя на подъем или спуск, выключение двигателя по достижении заданного этажа, открытие дверей и т. д.;
- приготовление кофе уличным автоматом: проверка полученной суммы денег, выпуск картонного стаканчика, заполнение его заданным количеством кофе, добавление заданного количества молока и т. д.

Одна и та же последовательность действий выполняется при массовом изготовлении многих изделий (например, болтов или подшипников), приготовлении теста для выпечки хлеба или вытачивании одинаковых изделий на деревообрабатывающем станке.

Все эти процессы представляют собой однозначную последовательность действий, выполняемых по командам управляющего устройства. Устройства такого типа часто называют *командоаппаратами*. Рассмотрим два варианта командоаппаратов: электромеханические и электронные.

Для выполнения линейного алгоритма нужно сформировать «жесткую» последовательность дискретных и аналоговых управляющих сигналов для исполнительных механизмов в соответствии с командами алгоритма. Так как мы рассматриваем электрические ИМ, то дискретные управляющие сигналы для них представляют собой просто импульсы напряжения, которые подаются на вход механизма путем замыкания электрической цепи, соединенной с источником напряжения. Следовательно, задача командоаппарата сводится к замыканию и размыканию в нужные моменты нужных контактов.

Аналоговые управляющие сигналы содержат информацию, представленную или уровнем напряжения, или длительностью импульса. Так как содержание информации в каждой команде линейного алгоритма известно заранее (например, «переместить суппорт на 11 мм»), то и нужное значение напряжения или длительность импульса (время пребывания контактов в замкнутом состоянии) могут быть сформированы заранее подбором параметров соответствующих элементов командоаппарата.

Рассмотрим возможные варианты построения командоаппаратов с «жесткой» логикой.

## 7.1.2. Командоаппараты без обратной связи

Под *обратной связью* обычно понимают передачу управляющему устройству ответной реакции объекта управления. В простейших устройствах такая передача не предусмотрена, т. е. предполагается, что управляющие сигналы всегда обрабатываются исполнительными механизмами именно так, как надо, и процесс всегда протекает должным образом. От такого командоаппарата требуется только замыкание и размыкание контактов в определенные моменты времени.

Электромеханический командоаппарат имеет в своем составе распределительный вал, который вращается электродвигателем, снабженным редуктором, с постоянной очень малой скоростью. На валу закреплены либо барабан, либо кулачки, либо диски с выступами, которые воздействуют на электрические контакты или другие исполнительные механизмы. На рис. 7.1 представлена схема организации управления двумя исполнительными механизмами. По мере вращения вала замыкаются контакты цепи питания того или иного механизма на время, определяемое протяженностью выступов. Один оборот вала соответствует полному циклу управления соответствующим оборудованием или этапом технологического процесса.

Конструкция такого командоаппарата очень проста, но при необходимости смены алгоритма управления приходится заменять вал с насадками или применять более сложные насадки — с регулируемым профилем.

Механические контакты можно заменить бесконтактными переключателями, например оптическими, если вместо кулачкового механизма использовать прозрачный диск с нанесенными в нужных местах непрозрачными участками. По достижении заданного угла поворота диска сквозь него на приемник света начинает падать световой поток, что равнозначно замыканию контактов. Оно про-

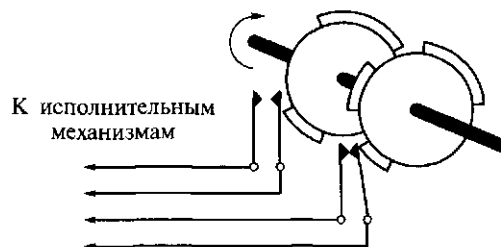


Рис. 7.1. Схема работы электромеханического командоаппарата

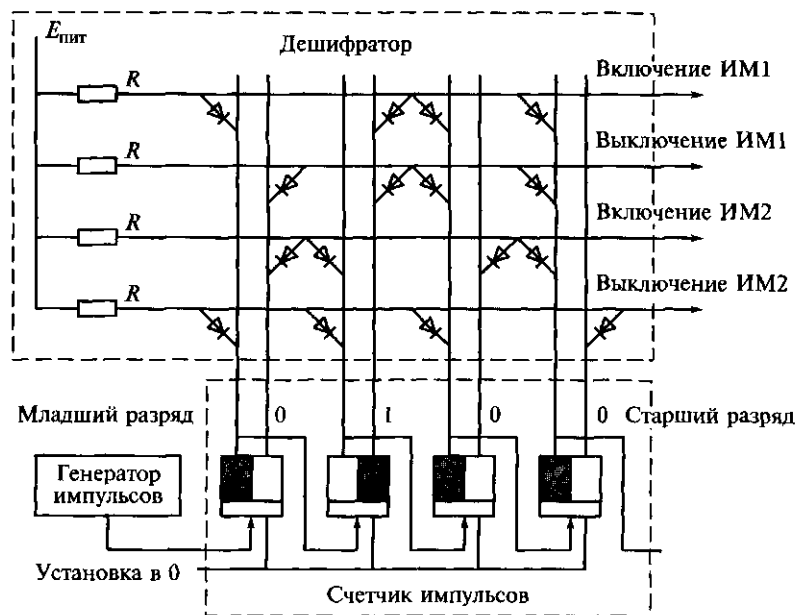


Рис. 7.2. Фрагмент схемы электронного командоаппарата

должается, пока диск не повернется на некоторый угол, при котором световой поток прервется непрозрачным участком.

На разных кольцевых дорожках диска могут размещаться программы управления различными независимыми друг от друга исполнительными механизмами, каждый из которых включается и выключается своим приемником света. Для смены алгоритма управления производится замена диска на другой.

Электронный вариант командоаппарата представлен на рис. 7.2. Генератор импульсов формирует последовательность импульсов, подсчитываемых счетчиком. Двоичные коды с выхода счетчика поступают на дешифратор — устройство, которое имеет несколько выходов и создает импульс напряжения на каждом из выходов только при определенном коде, поступающем со счетчика. В дешифраторе используются полупроводниковые диоды, включенные так, что при любом коде, кроме выбранного, хотя бы один диод, соединенный с данным выходом, находится в открытом состоянии и создает на выходе нулевой уровень напряжения. И только при выбранном коде все диоды закрыты и напряжение питания  $E_{пит}$  поступает через резистор  $R$  на выход дешифратора.

На рис. 7.2 показан вариант управления двумя исполнительными механизмами, хотя число выходов дешифратора и управляемых ИМ может быть любым. Распайка диодов на приведенной схеме такова, что первый исполнительный механизм включается при коде на выходе счетчика 0010, а выключается при 0011. Второй ИМ включается при коде 0101, а выключается при 1000. Включение и выключение различных исполнительных механизмов могут производиться с помощью реле, подключенных к выходам дешифратора. Конкретное время включения и выключения каждого ИМ зависит от частоты следования импульсов. При смене алгоритма нужно менять дешифратор или изменять распайку диодов в нем.

### 7.1.3. Командоаппараты с обратной связью

Командоаппараты без обратной связи работают фактически «вслепую», так как они формируют управляющие сигналы, не получая информации о том, выполняет ли кто-нибудь их команды и как в действительности протекает управляемый ими процесс. Этому недостатка лишены устройства с обратной связью, в которых очередной управляющий сигнал формируется только после получения подтверждения о выполнении предыдущей команды.

Для организации обратной связи управляемое оборудование должно быть оснащено датчиками, как правило, дискретными. Они выдают сигналы в момент достижения заданного значения какой-либо величины: координаты, температуры, скорости, давления и т.д. Эти функции выполняют концевые выключатели, реле давления, биметаллические реле температуры и другие дискретные датчики.

Использование сигналов обратной связи в электромеханическом командоаппарате невозможно, а электронный вариант это позволяет. Достаточно подать импульсы на вход счетчика согласовать с поступлением сигналов обратной связи, и переход счетчика в новое состояние будет происходить только после завершения действия, инициированного его предыдущим состоянием.

## 7.2. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

---

С появлением микропроцессоров (МП) началась новая эпоха в автоматизации производственных процессов. Благодаря способности устройств на базе МП практически мгновенно реагировать

на любые события в технологическом процессе, воспринимать за короткое время информацию, поступающую с большого количества различных датчиков, и формировать большое количество управляющих сигналов микропроцессоры получили широкое распространение на всех уровнях — от сбора и обработки данных до полного ведения технологического процесса. Изменилась и форма представления информации оператору и ее регистрации.

Микропроцессор — информационное устройство; он работает с информацией, представленной в виде двоичных чисел. Огромная эффективность МП как ключевого элемента средств управления базируется на двух принципах:

- любое значение любой физической величины можно записать в виде двоичного числа;
- любое действие любого исполнительного механизма можно закодировать в виде двоичного числа.

Следовательно, организовать причинно-следственную связь между значением технологического параметра (причиной) и требуемым воздействием на исполнительный механизм (следствием) можно путем перехода от одного двоичного числа к другому, выполненного по определенным правилам.

Такой переход и осуществляет микропроцессор, преобразуя с помощью арифметических и логических операций одни двоичные числа в другие. Какие именно операции нужно произвести, указывает программа управления работой МП, составленная на основе анализа зависимости между значением данного параметра и результатом воздействия данного ИМ на технологический процесс.

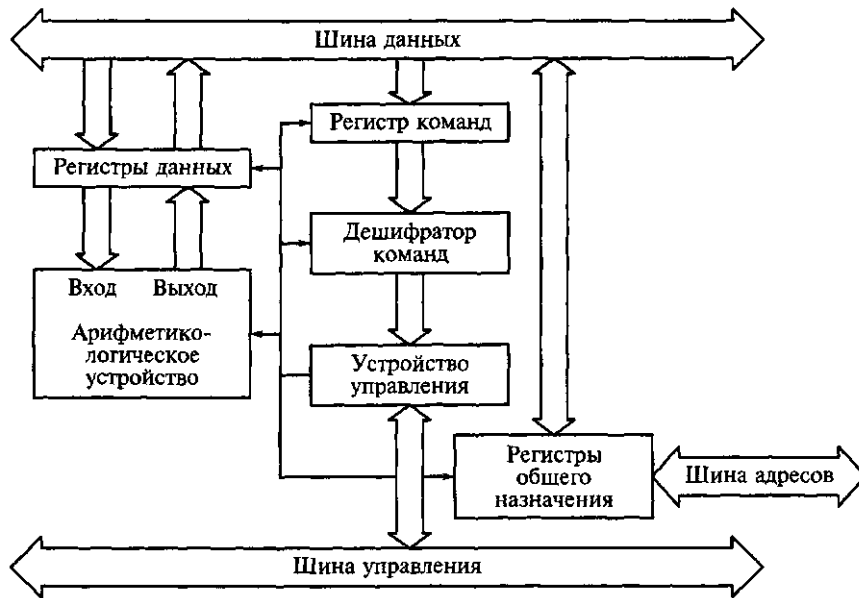
*Микропроцессор* — это программно-управляемое устройство, производящее преобразование двоичных чисел и выполненное в виде одной или нескольких интегральных схем.

Все другие функции микропроцессора, такие как обработка информации и формирование управляющих воздействий, относятся не к МП, а к управляющей программе.

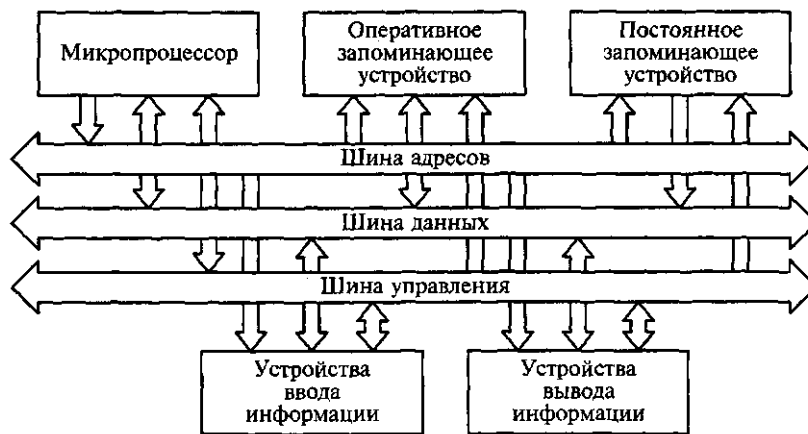
Общая схема микропроцессора приведена на рис. 7.3, а.

Микропроцессор состоит из арифметико-логического устройства (АЛУ), устройства управления (УУ) и внутренней памяти — регистров общего назначения (РОН). Устройства связаны тремя шинами. Каждая шина — это группа проводников, по которым передаются двоичные коды в виде сигналов 0 или 1.

Арифметико-логическое устройство выполняет арифметические (сложение, умножение) и логические (И, ИЛИ) операции над 8- или 16-разрядными двоичными числами. Числа поступают с шины



a



b

Рис. 7.3. Микропроцессор:  
a – общая схема; б – структура микроЭВМ



данных через регистры, обеспечивающие их временное хранение. Устройство управления координирует работу АЛУ и регистров в соответствии с командами программы. Устройство управления получает команды с шины данных через дешифратор команд. Команда представляет собой двоичное число: одна его часть — код операции, которую предстоит выполнить АЛУ, а другая часть указывает адрес расположения числа, над которым будет совершена операция (например, один из регистров РОН). Второе число поступает в АЛУ по шине данных. Результат выполнения операции записывается в один из регистров и далее поступает на шину данных.

Современные микропроцессоры состоят из миллионов транзисторов и выполняют сотни миллионов операций в секунду. Если снабдить МП более мощной памятью, устройствами ввода-вывода информации, а при необходимости и пультом управления, позволяющим вводить и отлаживать новые программы, то он превратится в микроЭВМ.

Структурная схема микроЭВМ на базе микропроцессора приведена на рис. 7.3, б.

МикроЭВМ имеет два вида памяти: постоянное (ПЗУ) и оперативное (ОЗУ) запоминающие устройства. Содержимое ПЗУ записывается изготовителем микроЭВМ и не может быть стерто. В ПЗУ хранят программы начальной загрузки микроЭВМ, константы, табличные данные и т. д. В ОЗУ информацию можно записывать и стирать многократно, поэтому оно используется для оперативного хранения данных, подлежащих обработке, промежуточных результатов, отладки программ и т. д. При выключении микроЭВМ информация в ОЗУ пропадает.

Устройства ввода и вывода обеспечивают прием и выдачу двоичных кодов обмена информацией с внешними устройствами.

Шины адресов, данных и управления используются для обмена информацией между всеми подключенными к ним устройствами в режиме разделения времени. Микропроцессор управляет подключением к шинам в каждый момент времени тех или иных устройств; для остальных устройств шины в это время недоступны.

Обычно микроЭВМ представляет собой набор унифицированных микросхем: микропроцессор, ПЗУ, ОЗУ и др. Все они согласованы между собой по уровням сигналов, входному и выходному сопротивлению, допустимым нагрузкам и иным параметрам.

Совершенствование технологии производства интегральных микросхем позволило создать микроЭВМ, которые вместе с жестким магнитным диском (долговременная память) размещаются в унифицированном герметичном корпусе, легко встраиваемом в каркас аппаратуры систем управления.

Варианты использования микропроцессоров и микроЭВМ в системах управления многообразны. До появления микроЭВМ системы управления были централизованными и одна мощная и быстродействующая ЭВМ обслуживала поочередно десятки и сотни датчиков и исполнительных механизмов. В современных децентрализованных системах управления центральная ЭВМ может отсутствовать вообще или использоваться только для учета и координации работ, а множество автономных микроЭВМ выполняют функции управления различными единицами оборудования и участками технологического процесса, вплоть до управления отдельными параметрами процесса.

На рис. 7.4 представлена укрупненная схема одноконтурной системы управления, обеспечивающей поддержание заданного значения регулируемого параметра объекта управления. Она иллюстрирует возможности устройства с ЭВМ в выборе оптимального варианта управления. МикроЭВМ не просто сравнивает значение регулируемого параметра с заданным, а учитывает результаты проведенного ею анализа поведения параметра в предшествующий период и выбирает наилучший в этой ситуации закон регулирования.

Устройства на базе микроЭВМ, специально ориентированные на выполнение задач контроля и управления в локальных (местных) системах, получили название «ремиконты» (РЕгулирующие МИКРО-КОНТроллеры). Кроме микроЭВМ они включают в себя устройства преобразования аналоговой и дискретной информации, которые называются устройствами ввода-вывода информации, и пульт оператора (рис. 7.5). Общая шина контроллера позволяет связывать его с другими аналогичными устройствами и главной ЭВМ. При необходимости перестройки системы управления достаточно изменить программу в микроЭВМ, не заменяя блоков и не перепаявая отдельных элементов.

Наряду с микроЭВМ в промышленности применяются программируемые контроллеры (ПК). Их используют в случаях, когда управление производится по результатам логической обработки входных

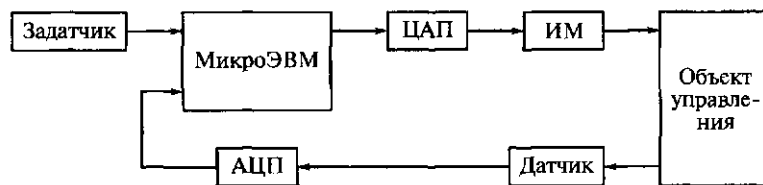


Рис. 7.4. Схема одноконтурной системы управления на базе микроЭВМ



Рис. 7.5. Схема ремиконта

сигналов без проведения сложных вычислений. Такой контроллер обычно не имеет средств для работы со стандартными языками программирования, применяемыми в микроЭВМ. Программа, вводимая в ПК, содержит набор команд управления, представленных на языке релейно-контактных схем или на аналогичном языке. Фактически программируемые контроллеры заменяют широко использовавшиеся ранее релейно-контактные системы управления, существенно превосходя их по надежности, удобству перепрограммирования и возможностям связи с системой управления производством предприятия.

Программируемые контроллеры содержат кроме микропроцессора и источника питания большее или меньшее (в зависимости от объекта управления) количество устройств преобразования информации, предназначенных для связи с технологическим оборудованием. Это устройства ввода данных, соединяемые с датчиками и преобразующие их аналоговые и дискретные сигналы в двоичные коды, принимаемые микропроцессором, и устройства вывода управляющих сигналов, соединяемые с исполнительными механизмами. При необходимости количество этих устройств может изменяться.

Микропроцессор, источник питания и устройства преобразования информации выполняют единообразными по конструкции и размещают в общем каркасе, соединяя их общими шинами и кабелями в единый контроллерный блок (рис. 7.6). Программа загружается в ПК с подключаемого к нему пульта программирования.

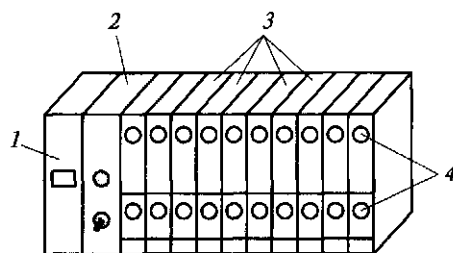


Рис. 7.6. Программируемый контроллер:

1 — микропроцессор; 2 — источник питания; 3 — устройства ввода-вывода; 4 — разъемы для связи с объектом управления

Программируемые контроллеры могут работать совместно с ЭВМ, выполняющей функции обработки данных и координации работы ПК. Дальнейшее развитие и удешевление микроэлектронных устройств ведет к тому, что происходит сближение различных видов локальных подсистем управления по их функциям и возможностям. В специальных промышленных компьютерах на базе микроЭВМ, как и в ПК, предусмотрено до 20 мест для установки устройств преобразования информации. Аналогично построены и ремиконты. Общая тенденция развития современных систем управления — распределение всего комплекса задач по управлению технологическим процессом по множеству подсистем, каждая из которых обладает интеллектуальным ядром в виде мощной микроЭВМ со своим набором устройств ввода и вывода информации, обслуживающих свой участок технологического процесса и соединенных в единую сеть с главной ЭВМ.

### 7.3. ЭВМ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Существуют три основные категории ЭВМ: большие универсальные ЭВМ, мини-ЭВМ и микроЭВМ. Принципы их построения одинаковы; отличия заключаются в основном в их мощности и размерах. Все три категории машин можно соединить с устройствами преобразования информации и использовать для ее сбора, обработки и выработки управляющих сигналов.

Однако поскольку области применения ЭВМ чрезвычайно разнообразны, производители уделяют основное внимание машинам общего назначения, ориентированным на решение широкого класса задач. Массовость производства снижает их стоимость, а широта применения облегчает и удешевляет обслуживание.

В то же время ЭВМ общего назначения далеко не всегда подходят для решения производственных задач. Дело в том, что они ориентированы на задачи, не привязанные к текущему времени. Все исходные данные вводятся в машину заранее, и программа по ходу вычислений сама определяет, когда их использовать. Большинство решаемых на ЭВМ задач сводятся к поискам результатов сложных вычислений. Если человека, работающего с ЭВМ, интересуют только эти результаты, то он не вмешивается в работу машины до их получения. Для него не важно, сколько времени машина потратит на расчеты. Никакие внешние обстоятельства и события не сказываются на работе ЭВМ в таком режиме (кроме отключения электропитания).

Совершенно иначе работает ЭВМ в системе управления технологическим процессом. Через датчики и исполнительные механизмы она соединяется непосредственно с процессом, протекающим в реальном времени. Взаимодействуя с оборудованием, ЭВМ вынуждена работать в темпе, задаваемом ходом ТП, т. е. в режиме реального времени. Действия, выполняемые машиной, часто определяются ситуацией, реально сложившейся в данный момент в процессе, а не оператором или программой. Программы находятся в постоянной готовности к поступлению данных из ТП, которые они тут же начинают обрабатывать, т. е. управляющая ЭВМ «работает» от внешних событий.

Важно, что реакция машины на сложившуюся ситуацию должна происходить в реальном времени и любые задержки в реализации, например, аварийных программ могут быть чреваты материальными и людскими потерями. Поэтому управляющая ЭВМ должна обладать максимальным быстродействием и большой вычислительной мощностью, которые могут потребоваться в любой момент.

Способность управляющих ЭВМ оперативно реагировать на события, происходящие в технологическом процессе, обеспечивается так называемым аппаратным прерыванием, когда выполнение текущей программы прерывается, чтобы отреагировать на внешнее событие выполнением специальной программы. После ее завершения машина возвращается к прерванной программе. Прерывание называется аппаратным потому, что оно инициируется аппаратурой, т. е. одним из устройств преобразования информации, обнаружившим выход параметра за предельно допустимое значение. Для приема такой информации в управляющей ЭВМ имеются специальные входы.

В реальных ЭВМ предусмотрено несколько уровней прерывания исходя из требуемой срочности реагирования на выход того или иного параметра за допустимые пределы. Сигнал прерывания более высокого приоритета, т. е. поступивший при отклонении более важ-

ного параметра, может прервать выполнение программы, обслуживающей прерывание более низкого приоритета (но не наоборот).

Приведем пример. Вы решили приготовить кофе с молоком, поставили посуду с молоком на плиту и занялись размалыванием зерен кофе в кофемолке. Бросив взгляд на плиту, вы увидели, что молоко вот-вот «сбежит», и в это время раздается звонок в дверь. Какова будет последовательность ваших действий?

Очевидно, процесс размалывания зерен придется прервать, но это не так важно — его можно будет возобновить позже. Что касается сбегающего молока и звонка в дверь, вам придется оценить приоритет каждого из этих факторов и начать с обслуживания того, которому вы присвоите больший приоритет.

Таким образом, размалывая зерна, вы получили два сигнала прерывания этого процесса. В соответствии с их уровнями приоритета вы сначала, наверное, максимально быстро снимете молоко с плиты, затем уже без спешки откроете дверь вашему гостю, а после этого вернетесь к продолжению прерванного процесса размалывания зерен.

Примерно так же реализуются прерывания в управляющей ЭВМ, только в качестве формирователей сигналов прерывания вам послужили ваши глаза и уши, а ЭВМ получает эти сигналы от устройств обработки информации, выданной датчиками технологических параметров.

Следовательно, для управления ответственными и сложными технологическими процессами необходимы специализированные ЭВМ, при разработке которых учитываются все указанные ранее факторы, но разработка, производство и обслуживание таких машин обходятся намного дороже.

## **7.4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

Любая ЭВМ, от микроЭВМ до большой, способна лишь на то, чтобы миллионы раз в секунду выполнять примитивные операции сравнения, сложения и сдвига двоичных чисел. Весь интеллект ЭВМ, все ее возможности, в том числе по управлению технологическими процессами, заключены в программном обеспечении ЭВМ.

Как указывалось в гл. 2, программа — это алгоритм, записанный на понятном машине языке. В свою очередь, алгоритм — это последовательность действий, ведущих к достижению цели. Следовательно, для того чтобы автоматическая система вела технологический про-

цесс, необходимо составить алгоритм этого процесса и записать его на языке, понятном машине.

Любой технологический процесс можно подразделить на этапы, которые, в свою очередь, можно разделить на более мелкие шаги, и т. д. Каждый этап, каждый шаг имеют свою цель, и можно составить последовательность действий по достижению этих целей, из которых и составит алгоритм всего процесса. Составитель алгоритма должен четко знать все нюансы работы оборудования, все условия и ограничения, все особенности технологического процесса.

Он должен описать каждое действие рабочего, который выполнял бы вручную соответствующие операции ТП, и учесть причины, по которым был выбран тот или иной вариант действий и которые не всегда очевидны (т.е. учесть то, что называется опытом и квалификацией) — ведь машине придется самой все учитывать и принимать решение.

Когда алгоритм составлен, нужно записать его на языке, понятном машине. Для самых первых ЭВМ программы писали на так называемых машинных языках, которые представляли собой набор двоичных кодов, соответствовавших командам работы арифметического устройства с двоичными числами. Затраты труда и времени на это были огромны, к тому же у каждого типа ЭВМ был свой машинный язык.

Сейчас программы составляют на языках высокого уровня, близких к человеческому языку, что очень удобно, а машина сама переводит команды с этих языков на свой (затрачивая на это некоторое время). Тем не менее для решения конкретных задач управления создаются специальные языки низкого уровня, более близкие к машинным и потому обеспечивающие более оперативное управление.

Например, для программирования станков с ЧПУ используют команды для выполнения каждой операции, представляющие собой сочетание буквенных и цифровых символов. Буквами обозначают наименование операции, условия ее выполнения, координату (или другой параметр), а цифры выражают численное значение или условный код параметра. В качестве буквенных обозначений используют сокращения или начальные буквы соответствующих терминов, поэтому они легко запоминаются и понимаются, что упрощает составление программы.

Так, команда установки частоты вращения шпинделя станка может выглядеть следующим образом: N35 G95 S800 M4, что означает: N35 — номер (N) команды (35); G95 — задание (G) частоты вращения шпинделя (код 95); S800 — численное значение (S) частоты вращения (800 об/мин); M — задание направления вращения; 4 — код

направления вращения (против часовой стрелки). Аналогично шаг за шагом программируются все операции, выполняемые станком. Программа записывается на магнитную ленту или диск, который устанавливается в командоаппарат станка.

Перевод команд в двоичные коды производится с помощью специальной программы — ассемблера. Ассемблер сравнивает каждую команду со списком команд, представленных в двоичном коде, и производит замену набора буквенно-цифровых символов на соответствующий двоичный эквивалент. Расшифрованные команды обрабатываются микроЭВМ станка, т. е. по каждому двоичному коду формируется однозначно соответствующий ему конкретный управляющий сигнал для конкретного исполнительного механизма.

Современные станки с ЧПУ содержат мощные микроЭВМ и оснащены пультами управления с дисплеями, позволяющими вводить и отлаживать программы непосредственно на станке. Большую роль играет удобство общения оператора с программой (например, количество ошибок существенно уменьшается, если вместо использования клавиатуры можно просто выбирать нужные пункты экранного меню).

МикроЭВМ, обслуживающие группу технологического оборудования, решают более широкий круг задач управления и связаны с большим объемом источников и приемников информации, поэтому алгоритмы управления для них более сложные. Программы для них создаются на языках более высокого уровня, например на языке FORTRAN или С. Для сокращения программ широко используют подпрограммы, аналогично вспомогательным алгоритмам. Многократные обращения к подпрограммам возможны как из разных мест одной и той же рабочей программы, так и из разных рабочих программ. Когда в основной программе возникает необходимость обращения к подпрограмме, производится ввод данных в эту подпрограмму, после чего ей передается управление. После выполнения подпрограммы управление возвращается основной программе.

Рассмотрим в качестве примера упрощенные действия по программированию работы бытовой стиральной машины. Пусть стирка включает в себя следующие этапы: впуск определенного количества воды, подогрев воды до заданной температуры, вращение барабана в течение заданного времени со сменой направления вращения, слив воды, отжим. Какие особенности этого технологического процесса нужно принять во внимание для его автоматизации?

Начнем с впуска воды. Для управления потоком воды можно использовать электроклапан, управление которым сводится к подаче на него управляющего сигнала в виде электрического напряжения



на все время впуска. Окончание этого времени можно определить по сигналу датчика уровня жидкости, который может быть дискретным и выдать информацию о достижении нужного уровня путем замыкания контактов электрической цепи. Этот сигнал используется для выключения электроклапана.

Следующий этап — подогрев воды до нужной температуры. Нам нужно будет выдать дискретный управляющий сигнал на нагреватель, включив его, и следить за информацией с датчика температуры. Так как значения температуры стирки являются фиксированными и задаются заранее, можно использовать дискретный релейный датчик, который по достижении заданной температуры замкнет электрическую цепь. По этому сигналу нагреватель следует выключить.

Затем нужно запустить процесс стирки. На электродвигатель машины выдается управляющий сигнал, включающий его на заданное время, например на 10 с. Это время должно отсчитываться счетчиком, включаемым по команде управляющего устройства и соединенным с генератором импульсов. После поступления количества импульсов, соответствующего (с учетом их частоты) интервалу времени 10 с, код на выходе счетчика достигает значения, на которое настроен дешифратор, и тот формирует сигнал выключения двигателя.

Затем управляющее устройство выдает сигнал на реле переключения направления вращения двигателя и снова включает его на заданное время, повторяя эти операции в цикле заданное количество раз (например, 100).

Слив воды аналогичен впуску, но одновременно с электроклапаном слива включается насос, откачивающий воду, а для их выключения используется сигнал датчика нулевого уровня воды.

Для отжима снова включается двигатель на заданное время (например, на 30 с) и параллельно включается реле, переключающее цепь управления частотой вращения двигателя, так как при отжиме она существенно выше, чем в режиме стирки.

Таким образом, управляющее устройство должно воспринимать дискретные сигналы двух датчиков уровня воды, датчика температуры и дешифратора и выдавать дискретные управляющие сигналы на электроклапаны впуска и выпуска воды, нагреватель, электродвигатель, счетчик и реле переключения направления вращения и переключения скорости двигателя.

После такого подробного анализа технологического процесса и необходимых информационных и управляющих сигналов нетрудно составить алгоритм процесса, а затем и программу на одном из языков программирования.

Этот пример дает представление о работе, которую необходимо проделать для автоматизации только одного небольшого процесса. Представьте себе весь объем работ по автоматизации технологических процессов на производстве.

В настоящее время используют распределенные АСУ ТП, в которых программы выполнения отдельных этапов процесса выполняются программируемыми контроллерами и микроЭВМ, обслуживающими отдельные единицы или группы технологического оборудования. Координацию работы этих устройств выполняет ЭВМ верхнего уровня.

Обычно в память ЭВМ загружают много программ, рассчитанных как на обслуживание различных участков технологического процесса, так и на решение параллельных задач: вычисление, анализ, представление информации оператору и др. Дело в том, что центральный процессор ЭВМ работает гораздо быстрее, чем оборудование ТП. Пока исполнительные механизмы обрабатывают выданные им команды, ЭВМ может заняться другой работой (фоновой), например пересылкой информации оператору, выполняя эту работу по другой (фоновой) программе. Когда контроллер или микроЭВМ нижнего уровня будет нуждаться в подключении к верхней ЭВМ, он сформирует сигнал, который вызовет прерывание фоновой программы и ЭВМ вернется к программе обслуживания оборудования технологического процесса.

Такой режим использования ЭВМ называется *мультипрограммным*. И хотя машина решает различные задачи (точнее, фрагменты различных задач) последовательно во времени, из-за высокой скорости ее работы складывается впечатление, что все задачи решаются одновременно.

Программы разного уровня сложности могут создаваться на ЭВМ общего назначения с помощью систем автоматизации программирования. Эти системы позволяют не только составить программу, но и смоделировать ее работу в той ЭВМ, где она будет размещена, а также отладить программу, выполняя при необходимости корректировку в любом ее месте.

## **7.5. СОПРЯЖЕНИЕ ЭВМ С ОБЪЕКТОМ УПРАВЛЕНИЯ**

Все технические средства контроля и управления технологическими процессами, включая ЭВМ, можно разделить по месту их расположения на две основные группы:

1) средства, которые располагаются непосредственно на технологическом оборудовании или рядом с ним;

2) средства, которые размещаются в помещениях службы контроля и управления либо рядом с ними, на удалении от оборудования технологического процесса.

К первой группе относятся датчики и исполнительные механизмы, ко второй группе — ЭВМ и электронные устройства преобразования сигналов. Связующим звеном между ними являются переходные устройства.

Тем не менее при существующем многообразии технических средств и ЭВМ система контроля и управления технологическим процессом должна представлять собой единый организм, построенный единообразно и функционирующий по общим правилам. Наиболее рациональный путь создания таких систем заключается в использовании стандартных устройств, выпускаемых промышленностью и удовлетворяющих следующим требованиям.

1. Системные требования. Должна быть предусмотрена возможность связи с широкой номенклатурой датчиков (давления от вакуума до  $10^7$  Па; температуры от  $-270$  до  $3\,000^\circ\text{C}$ ; частоты вращения от 10 до 300 000 об/мин и т. д.) и исполнительных механизмов (электродвигатели постоянного и переменного тока, электроклапаны, пускатели, электромагниты и реле с напряжением от 12 до 380 В и т. д.).

2. Требования к соединению с ЭВМ. Они связаны с удобством подключения технических средств к ЭВМ, обмена сигналами с ЭВМ, помехозащищенностью каналов связи с ЭВМ и т. д.

3. Конструктивные требования. Они связаны с созданием удобной для эксплуатации конструкции технических средств АСУ.

Организация связи технических средств системы контроля и управления с ЭВМ называется *сопряжением ЭВМ с технологическим процессом*.

Перечисленные ранее требования удовлетворяются при использовании магистрально-модульного принципа построения электронных средств АСУ.

Согласно этому принципу каждое из электронных устройств (усилители, АЦП, ЦАП, входные и выходные регистры, в том числе силовые устройства для управления исполнительными механизмами) или группа однотипных устройств представляет собой отдельный унифицированный модуль со своими входными и выходными разъемами. Это может быть отдельная плата, включаемая в один из свободных слотов (разъемов) промышленного компьютера, или законченный унифицированный блок, располагаемый в унифицированном каркасе (крейте).

Все модули (и отдельные платы, и унифицированные блоки) подключаются к единой стандартной магистрали, по которой передаются в ЭВМ преобразованные в двоичные коды данные о параметрах ТП, а от ЭВМ поступают (также в виде двоичных кодов) управляющие сигналы для исполнительных механизмов. Работу всех модулей синхронизирует контроллер, выполненный, как и остальные модули, в едином конструктивном оформлении.

Первая магистрально-модульная система САМАС (Computer Application to Measurement And Control — применение компьютера для измерения и управления) была разработана в 70-х гг. XX в. в США. Это была информационно-измерительная система для проведения сложных экспериментальных исследований в области ядерной физики, но затем она стала использоваться в медицине, промышленности и даже в сельском хозяйстве.

В России аналогичная система СУММА (Система унифицированных модулей многомашинного анализа) появилась в конце 1970-х гг. в Институте физики высоких энергий (г. Протвино), а уже в 1980-е гг. широко выпускалась в Дубне как магистрально-модульная система «Вектор».

Принцип систем «Вектор» и САМАС один и тот же, одинаковы и конструктивные решения, за исключением того, что размеры модулей в системе «Вектор» измеряются в миллиметрах, а в системе САМАС — в дюймах. В обеих системах стандартизованы:

- виды модулей (блоков): входные и выходные регистры, усилители, АЦП, ЦАП, коммутаторы, счетчики, измерители давления, температуры, вакуума;
- размеры конструктивных элементов: плат, разъемов, каркасов, стоек;
- источники питания: напряжения +5, -5, +12, -12, +24, -24 В постоянного тока, 220 В переменного тока частотой 50 Гц;
- параметры сигналов от датчиков: ток — от 0 до 5 или до 20 мА, напряжение — от 0 до 10 В;
- электрические схемы соединений;
- правила обмена данными между устройствами.

Основной конструктивный элемент обеих систем — стойка, в которой размещается до трех каркасов с модулями и источниками питания. В каждом каркасе устанавливается до 25 модулей одиночной ширины (20 мм для системы «Вектор» и около 2/3 дюйма (17,2 мм) для САМАС) с 90-контактными разъемами на задней панели. В свою очередь, на задней стенке каркаса разме-

щены 25 стандартных 90-контактных разъемов, подключенных к магистрали.

Магистраль обмена данными между модулями и ЭВМ представляет собой большое количество проводников (в виде отдельных проводов или дорожек печатной платы), соединяющих параллельно все одноименные выводы всех разъемов (за исключением разъема источника питания, который имеет свою схему соединений). Группы проводников магистрали, передающих однородные сигналы или выполняющих однородные функции, называются шинами: шины данных, шины питания и т. д. Каждый модуль по специальным направляющим вставляется в каркас до полного соединения разъемов и подключения к общей магистрали.

Модуль представляет собой плату с микросхемами и является, как правило, многоканальным устройством (регистры на 16, 32, 64, 128 каналов; измеритель температуры на 16 каналов и т. д.). Возможно размещение на одной плате нескольких различных устройств (например, АЦП, ЦАП, усилитель).

На передней панели каждого модуля устанавливаются разъемы, с помощью которых он соединяется с датчиками и исполнительными механизмами. Это, как правило, тоже многоконтактные разъемы.

Если для управления технологическим процессом недостаточно того количества модулей, которое размещается в каркасе (т. е. дат-

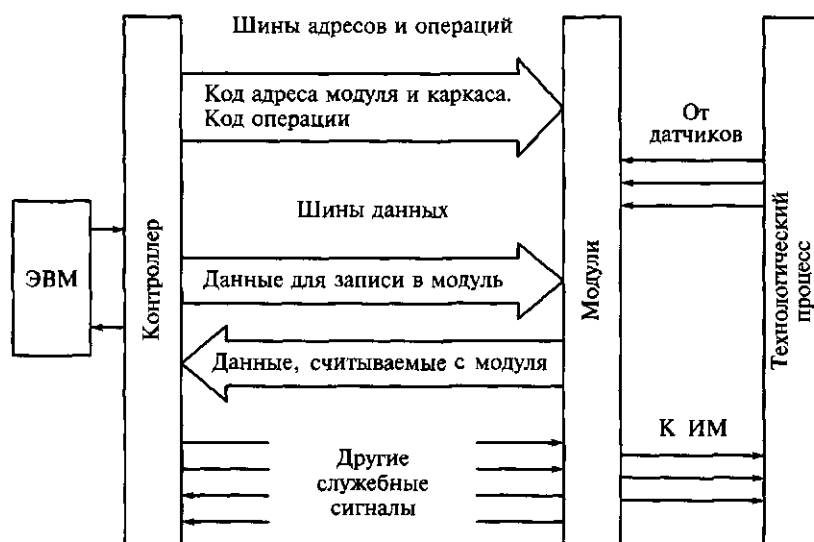


Рис. 7.7. Структура магистрали

чиков и исполнительных механизмов много), то в стойку помещают второй каркас с собственным набором модулей, а при необходимости — и третий каркас.

Обмен информацией между модулями и ЭВМ обеспечивает единый для всей стойки контроллер. В его состав может входить свой микропроцессор, ведущий сложную обработку сигналов и управляющий очередностью их обработки другими модулями. В первую очередь, обрабатываются аварийные сигналы, затем — сигналы в цепях защиты, далее — быстроизменяющиеся сигналы и т. д.

Микропроцессор контроллера выполняет предварительную обработку сигналов и накопление информации от модулей стойки, что ускоряет работу всей системы управления.

Контроллер связан магистралью со всеми модулями каркаса. Особенностью магистрали является работа в режиме поочередной передачи информации, т. е. в каждый момент магистраль занята каким-то одним модулем, от которого она получает или которому передает информацию. Именно контроллер определяет, какому из модулей предоставлять магистраль в каждый конкретный момент.

Магистраль имеет следующую структуру (рис. 7.7):

- шины адресов и операций, по которым передается код допускаемого контроллером к магистрали модуля и условный код совершаемой операции (например, передача данных из устройства № 2 выбранного модуля в ЭВМ);
- шины данных, по которым передается в цифровом виде от модулей в ЭВМ информация о технологических параметрах и от ЭВМ в модули коды управляющих сигналов;
- шины служебных сигналов, например сигналов прерываний, сигналов аварийных ситуаций, запроса модулем магистрали или сигнала готовности модуля к работе и др.

В памяти микропроцессора контроллера хранится программа опроса модулей. Например, необходимо получить от одного из датчиков информацию о значении технологического параметра. Известно, с каким именно модулем соединен выход датчика. Контроллер выводит на шины адресов двоичный код этого модуля, соединяя с источником напряжения те из шин, на которых в соответствии с кодом должен быть логический сигнал 1. Этот двоичный код поступает на все модули, подключенные к магистрали. Но только в одном модуле дешифратор «опознает» код как свой, разрешая расположенным в этом модуле устройствам выполнить указанную контроллером операцию, например преобразовать сигнал от нужного датчика в двоичный код. Этот же дешифратор разрешает выходным цепям модуля

вывести двоичный код результата на шины данных, по которым он поступает для дальнейшего анализа в микропроцессор или ЭВМ.

Для управления технологическим оборудованием микропроцессор выдает на шины адресов код модуля, с которым соединен нужный исполнительный механизм, а на шины данных — двоичный код управляющего сигнала.

Обычно этот код принимает модуль цифроаналогового преобразователя, который и формирует аналоговый управляющий сигнал для исполнительного механизма.

Магистрально-модульный принцип организации передачи информации между различными устройствами широко применяется в современных системах контроля и управления технологическими процессами.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Что такое командоаппарат? Когда он используется?
2. Что такое обратная связь?
3. Опишите работу механического командоаппарата.
4. Приведите пример электронного командоаппарата и опишите его работу.
5. Что такое микропроцессор?
6. Перечислите основные части микропроцессора и их функции.
7. Перечислите основные части микроЭВМ.
8. Что называют шиной? Какие шины и для чего использует микроЭВМ?
9. Что такое ремиконт?
10. Каковы функции программируемого контроллера?
11. В чем особенность работы ЭВМ в АСУ ТП?
12. Что такое аппаратное прерывание и зачем оно нужно?
13. Объясните смысл приоритетов сигналов прерывания.
14. Какая разница между машинными языками и языками высокого уровня?
15. К какому языку — машинному или высокого уровня — ближе язык программ для станков с ЧПУ?
16. Зачем в ЭВМ используют мультипрограммный режим?
17. Что называют сопряжением ЭВМ с объектом управления?
18. В чем заключается магистрально-модульный принцип построения электронных средств АСУ?
19. Какие магистрально-модульные системы вы знаете?
20. Какова роль контроллера при использовании магистрально-модульного принципа?
21. Как происходит выбор модуля и передача в него данных по магистрали?

# ГИБКИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРОИЗВОДСТВА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Всю свою жизнь человечество стремилось облегчить труд людей, сделать его более привлекательным, производительным, сократить число участников выпуска той или иной продукции, сделать производство по возможности безлюдным, поручить рутинные или опасные операции машинам и механизмам. Особенно это касалось массового производства, когда рабочему каждый день в течение многих месяцев и лет приходилось выполнять одни и те же операции. Это не могло не утомлять рабочего и неизбежно снижало производительность труда. Автоматизация производства решила эти проблемы: станки-автоматы стали выполнять основные операции, а работающие в тесном контакте с ними роботы — вспомогательные и транспортно-складские операции.

Однако интенсивное развитие общества поставило перед производством новые задачи. Разработка новых видов товаров, постоянное совершенствование изделий, быстрое развитие науки и технологий привело к сокращению ассортимента продукции массового производства и стремительному росту объемов выпуска изделий, изготавливаемых малыми партиями и требующих постоянной переналадки оборудования. И время, и стоимость переналадки стали заметным тормозом развития производства и привели к появлению гибких производственных систем.

### 8.1. ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

#### 8.1.1. Жесткие и гибкие системы

Первые автоматизированные и автоматические системы позволили автоматизировать отдельные технологические операции на станках, затем появились станки-автоматы, работающие без участия человека.



Объединение станков-автоматов, каждый из которых настроен на выполнение определенной операции, в группу с единой системой управления стало основой построения жестких автоматических линий, составивших первый этап автоматизации.

В такой линии станки располагаются по ходу технологического процесса и связаны между собой единой транспортной системой, позволяющей передавать заготовки от одного автомата к другому.

По характеру движения заготовок вдоль линии жесткие автоматические линии можно подразделить на три типа:

- синхронные, когда все станки работают в едином такте, а заготовки передаются от одного станка к другому с помощью жестких транспортных линий. Выход одного автомата из строя останавливает всю линию;
- асинхронные, когда все автоматы работают независимо друг от друга по времени, имея в бункере определенный запас заготовок или деталей, и обслуживаются гибкой транспортной системой. В такой системе отказ одного автомата в течение определенного времени (обычно нескольких часов) не сказывается на работе линии в целом;
- роторные, в которых детали обрабатываются в процессе их перемещения от одной роторной машины к другой.

Автоматические линии позволяют освободить рабочего от монотонного физического труда, повысить производительность, снизить себестоимость и повысить качество выпускаемой продукции.

В то же время жесткие автоматические линии работают с жесткой логикой и настроены на выпуск продукции одной номенклатуры.

Малейшие изменения в конструкции детали или технологическом процессе требуют длительной остановки оборудования, переналадки и его, и системы управления.

Новый виток развития автоматизации стал возможным после внедрения электронно-вычислительной техники, особенно управляющих ЭВМ. Это, в свою очередь, способствовало созданию оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ).

Все технологические операции по изготовлению детали на станке сводятся к перемещению рабочих органов на определенное расстояние, в определенном направлении и с определенной скоростью.

Это значит, что каждый шаг при обработке детали можно закодировать и выразить все операции в виде чисел, следующих друг за другом. Если эти числа занести в память станка (на перфоленту, перфокарту, магнитные носители) в виде программы (поэтому такое название — «числовое программное управление»), то считывающее

устройство по командам программноносителя сможет управлять рабочими органами станка. При этом последовательность чисел преобразуется в электрические сигналы, которые рабочие органы обрабатывают, перемещаясь с помощью исполнительных механизмов на определенное расстояние, с определенной скоростью и в определенном направлении.

В сочетании с ЭВМ станки с ЧПУ обеспечивают:

- оптимальные режимы во время обработки детали;
- максимальные скорости перемещения рабочих органов во время холостого хода.

Именно внедрение оборудования с числовым программным управлением дало возможность отказаться (за пределами массового производства) от жестких автоматических линий, направленных на выпуск изделий и продукции одной номенклатуры, и перейти к следующему уровню автоматизации.

Второй этап автоматизации — создание перепрограммируемого оборудования — позволил наладить массовый выпуск продукции широкой номенклатуры, в том числе небольшими партиями в мелко-серийном производстве. Это стало возможным благодаря появлению *гибких производственных систем (ГПС)* разных уровней — от групп, состоящих из нескольких единиц технологического оборудования, до полностью автоматизированных производств.

Основной единицей ГПС можно считать многооперационный станок с ЧПУ, в котором переналадка на выпуск нового изделия сводится в основном к перепрограммированию решаемых задач. Под управлением микроЭВМ такие станки автоматически выполняют операции технологического процесса, автономно осуществляя многократные технологические циклы. Они снабжаются системами автоматического контроля и измерения параметров изделия в процессе обработки, устройствами диагностирования состояния оборудования, средствами автоматической загрузки-выгрузки заготовок, могут включать в себя устройства для замены технологической оснастки и т. д. Такие единицы технологического оборудования получили название *гибких производственных модулей (ГПМ)*.

С их появлением стало возможным на одном и том же оборудовании выпускать сотни новых образцов продукции, регулярно модернизировать ее и улучшать качество.

Гибкие производственные модули могут работать не только автономно, но и во взаимодействии с другим технологическим оборудованием. Группа ГПМ, объединенных автоматизированной транспортно-складской системой и работающих под управлением

центральной ЭВМ, образует *гибкую автоматизированную линию*. Несколько таких линий, объединенных общей системой управления, представляют *гибкий автоматизированный участок*, или *гибкий автоматизированный цех*.

Если в общий процесс производства продукции включить и такие этапы, как автоматизированное проектирование продукции, технологии ее изготовления и технологической подготовки производства, что возможно с помощью современных ЭВМ, то получится современное высокоэффективное *гибкое автоматизированное производство (ГАП)*.

Гибкое автоматизированное производство обеспечивает:

- возможность быстрого изменения программы производства изделий;
- сочетание высокой производительности с малыми размерами партий изделий и коротким периодом освоения их производства;
- резкое сокращение себестоимости продукции;
- значительное сокращение численности работающих, вплоть до внедрения безлюдных производств;
- повышение производительности труда в 2—3 раза за счет непрерывной круглосуточной и круглогодичной работы оборудования;
- повышение качества продукции.

### 8.1.2. Структура ГАП

Гибкое автоматизированное производство состоит из двух основных частей:

1) гибкой производственной системы, обеспечивающей сам процесс производства продукции;

2) систем автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированной системы научных исследований (АСНИ), автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП). Все эти системы представляют собой автоматизированные рабочие места (АРМ), работающие под управлением специальных программ и включаемые в единую вычислительную систему.

В свою очередь, ГПС, обеспечивающая процесс производства, состоит из трех основных систем: технологической, транспортно-загрузочной и управления.

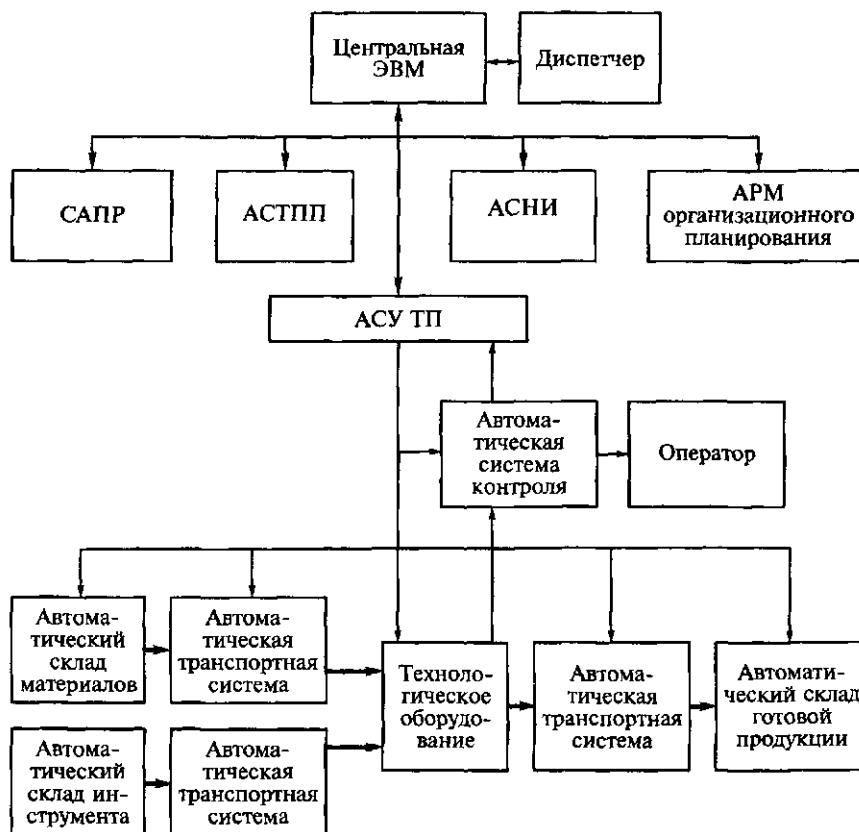


Рис. 8.1. Структурная схема ГАГ:

→ — движение информационных потоков; ⇄ — движение материальных потоков

*Технологическая система* содержит технологическое оборудование, например в виде многооперационных станков с ЧПУ, включенных в единый комплекс, управляемый ЭВМ.

*Транспортно-загрузочная система* включает в себя вспомогательное оборудование, предназначенное для выполнения работ по транспортированию материалов, заготовок, инструмента, готовой продукции, отходов производства и складированию. Она состоит из типовых автоматических модулей: транспортных, складских и др.

*Система управления ГПС* включает в себя центральную управляющую ЭВМ, устройства управления АСУ ТП и микроЭВМ станков, кото-

рые содержат программы обработки тех или иных деталей. Центральная ЭВМ следит за прохождением каждой партии деталей, распределяет их по станкам, ведет диагностику и учет состояния каждого станка и т. д.

Структурная схема ГАП представлена на рис. 8.1. В работе ГАП принимают участие высококвалифицированные специалисты и рабочие: инженеры, научные работники, программисты, обслуживающие и ремонтные бригады, диспетчеры.

Автоматизированное рабочее место каждого специалиста представляет собой персональную ЭВМ, программное обеспечение которой ориентировано на область деятельности данного специалиста. Все АРМ объединены с центральной ЭВМ в единую вычислительную сеть.

Центральная ЭВМ собирает информацию с АРМ научного работника, конструктора, технолога, организационного планирования и в виде соответствующих данных отправляет в автоматизированную систему управления технологическим процессом.

АСУ ТП управляет технологическим оборудованием и одновременно всеми вспомогательными системами: автоматическим складом материалов (или заготовок, или комплектующих), автоматической транспортной системой доставки материалов к технологическому оборудованию, автоматическим складом инструмента и автоматической системой его доставки к технологическому оборудованию, автоматической транспортной системой доставки готовой продукции и складом готовой продукции, автоматической системой контроля готовой продукции, непрерывно контролирующей точность и качество ее изготовления.

Таким образом, в единую систему включена как разработка всего комплекта документов на продукцию, так и ее изготовление и складирование.

## 8.2. РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Широкое применение в ГПС нашли роботы. Роботы, используемые в промышленности, называются *промышленными роботами*.

Слово «робот» появилось в начале XX в. и происходит от чешского слова *robota*, что переводится как тяжелый подневольный труд. Робота можно определить как универсальный механизм, способный выполнять физическую работу аналогично человеку. Именно стремление заменить человека на тяжелых и опасных работах породило идею создания робота.

*Робот* — автоматический манипулятор, выполняющий рабочие операции со сложными пространственными перемещениями.

Универсальность (многофункциональность) роботов позволяет широко использовать их как в качестве основного технологического оборудования (операции сборки, сварочные и малярные работы), так и в качестве вспомогательного оборудования (в транспортно-загрузочных системах, системах контроля и диагностики). При этом робот по своим возможностям намного превосходит человека. Он может работать в тяжелых, некомфортных, вредных или опасных условиях. Он превосходит человека по грузоподъемности, быстродействию, точности. Ему не нужны перерывы в работе, отдых, отпуск и все то, что свойственно человеку как биологическому организму.

История роботов началась в Древнем Египте, где строились статуи богов с подвижными руками и головой. Еще в XII в. были созданы первые человекоподобные механические фигуры — андрониды, изображавшие слуг, музыкантов, писцов. Для приведения в движение их частей использовалась потенциальная энергия воды, пара или гири. В середине XVII в. талантливый нижегородский механик-самоучка И. П. Кулибин разместил целый музыкальный театр-автомат в корпусе часов размером с гусиное яйцо. Эти часы до сих пор поражают воображение посетителей Государственного Эрмитажа. В XX в. в связи с развитием электроники появились достаточно сложные роботы, управляемые голосом или по радио, которые двигались, садились, вставали и выполняли простые операции.

Первые промышленные роботы появились на автомобилестроительных заводах США в 60-е гг. XX в. В 1975 г. в мире насчитывалось всего около 8 тыс. роботов. В 2005 г. их количество составляло уже 2,5 млн. Первое место в мире по производству и применению роботов занимает Япония. Далее следуют США, Италия, Франция, Швеция. Первый отечественный телеуправляемый робот с осязательным захватным устройством для глубоководных работ был создан в 1968 г. К роботам можно отнести и манипуляторы, выполняющие на расстоянии работы, опасные для человека. Это работа с ядерными, химическими или биологическими веществами, подводные работы, работы в открытом космосе.

В 1985 г. парк промышленных роботов в России превышал 40 тыс. шт. и достигал 40 % мирового парка. Однако в 90-е гг. XX в., к сожалению, плановые работы по развитию робототехники были остановлены, парк роботов сократился на порядок.

Сегодня роботы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности: в машиностроении, строительстве, сельском хозяйстве, медицине, науке, пищевой и легкой промышленности. Лишь роботу под силу глубоководные работы в океане или работы в открытом космосе, в том числе на Луне и Марсе.

Системы и комплексы, включающие в себя роботы, называются *роботизированными*, а системы и комплексы, в которых роботы выполняют основные технологические операции, — *робототехническими*.

Робот состоит из двух основных систем:

- исполнительной, включающей в себя манипуляторы и устройства передвижения;
- информационно-управляющей.

Основное применение нашли *механические манипуляторы*, выполняемые в виде кинематических пар с угловым и поступательным движением, заканчивающиеся захватным устройством (аналог кисти человека) или специальным инструментом (например, для сварки или покраски). Как правило, они имеют от трех до шести степеней подвижности, что позволяет получить более сложные траектории движения и расширить возможности робота.

В качестве *устройств передвижения* в мобильных роботах нашли применение традиционные транспортные средства, использующие электрическую, пневматическую и гидравлическую энергию, — колесные, гусеничные и шагающие. С одной стороны, они позволяют расширить рабочую зону, обслуживаемую роботом, а с другой — позволяют создать роботы, предназначенные только для перемещения грузов, — робокары. Робокары, как правило, не имеют манипуляторов и рассчитаны на работу со стационарными манипуляторами, расположенными на складах, и с контейнерами для отходов.

*Информационно-управляющая система* робота предназначена для обслуживания исполнительной системы. Она снабжена сенсорными органами, предоставляющими информацию о внешней среде и положении робота в ней — не столкнуться бы с роботом-соседом! Это органы технического зрения и различного рода измерители (температуры, положения в пространстве и т.д.), основу которых составляют соответствующие датчики.

Особенно эффективна совместная работа роботов со станками с ЧПУ; при этом система ЧПУ станка и робота может быть общей.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. В чем различие между жесткими и гибкими производственными системами?
2. Назовите типы жестких автоматических линий. В чем особенность каждого типа?
3. Назовите задачи, решаемые гибким автоматизированным производством.

4. Поясните структурную схему ГАП.
5. Дайте определение робота и опишите его возможности.
6. В чем различие между роботизированными и робототехническими комплексами?
7. Из каких основных систем состоит робот? Каково назначение каждой системы?



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — М. : Изд. центр «Академия», 2004. — 576 с.
2. Белянин П. Н. Гибкие производственные системы : учеб. пособие / П. Н. Белянин, М. Ф. Идзон, А. С. Жогин. — М. : Машиностроение, 1988. — 256 с.
3. Головенков С. Н. Основы автоматики и автоматического регулирования станков с программным управлением : учебник / С. Н. Головенков, С. В. Сироткин. — М. : Машиностроение, 1988. — 288 с.
4. Горошков Б. И. Автоматическое управление : учебник / Б. И. Горошков. — М. : Изд. центр «Академия», 2003. — 304 с.
5. Гуревич Б. М. Справочник по электронике для молодого рабочего. — 4-е изд., перераб. и доп. / Б. М. Гуревич, Н. С. Иваненко. — М. : Высш. шк., 1987. — 272 с.
6. Давиденко К. Я. Технология программирования АСУ ТП / К. Я. Давиденко. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 184 с.
7. Ильяшенко Л. А. Электрооборудование промышленных установок с программируемым управлением : учеб. пособие / Л. А. Ильяшенко. — М. : Высш. шк., 1987. — 79 с.
8. Келим Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления : учеб. пособие / Ю. М. Келим. — М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2002. — 384 с.
9. Мини- и микроЭВМ в управлении промышленными объектами / [Л. Г. Филиппов, И. Р. Фрейдзон, А. Давидовичу и др.] ; под ред. И. Р. Фрейдзона, Л. Г. Филиппова. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1984. — 336 с.
10. Справочник проектировщика АСУ ТП / [Г. Л. Смилянский, Л. З. Амлинский, В. Я. Баранов и др.] ; под ред. Г. Л. Смилянского. — М. : Машиностроение, 1983. — 527 с.
11. Ступин Ю. В. Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ / Ю. В. Ступин. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 288 с.
12. Терган В. С. Основы автоматизации производства : учеб. пособие / В. С. Терган, И. Б. Андреев, Б. С. Либерман. — М. : Машиностроение, 1982. — 270 с.
13. Черпаков Б. И. Автоматизация и механизация производства : учеб. пособие / Б. И. Черпаков, Л. И. Вереина. — М. : Изд. центр «Академия», 2004. — 384 с.
14. Шандров Б. В. Автоматизация производства (металлообработка) : учебник / Б. В. Шандров, А. А. Шаларин, А. Д. Чудаков. — М. : ИРПО : Изд. центр «Академия», 2002. — 256 с.
15. Шишмарев В. Ю. Автоматизация технологических процессов : учеб. пособие / В. Ю. Шишмарев. — М. : Изд. центр «Академия», 2005. — 352 с.

16. *Шишмарев В. Ю.* Автоматика : учебник / В. Ю. Шишмарев. — М. : Изд. центр «Академия», 2005. — 288 с.
17. *Шишмарев В. Ю.* Типовые элементы систем автоматического управления : учебник / В. Ю. Шишмарев. — М. : Изд. центр «Академия», 2004. — 304 с.
18. *Юревич Е. И.* Основы робототехники : учеб. пособие. — 2-е изд. / Е. И. Юревич. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 416 с.

### Пример реализации алгоритма техническими средствами автоматизации

Рассмотрим этапы продвижения от алгоритма к его реализации сначала отдельными электронными устройствами, а затем с помощью микропроцессорного устройства управления.

В качестве автоматизируемого процесса выберем процесс поддержания заданного значения температуры объекта.

В подразд. 2.2.4 приведено словесное описание алгоритма «Нагрев до  $t$ » (см. с. 26), а в подразд. 2.3.2 представлена его блок-схема (см. с. 33).

Согласно поставленной задаче, заданная температура  $t_0$  должна поддерживаться постоянно, т. е. по мере остывания объекта должен повторно включаться нагреватель.

Для решения этой задачи необходимо организовать цикл непрерывной работы системы. Поскольку температура  $t$  объекта должна поддерживаться все время, пока аппаратура находится в рабочем состоянии, в качестве

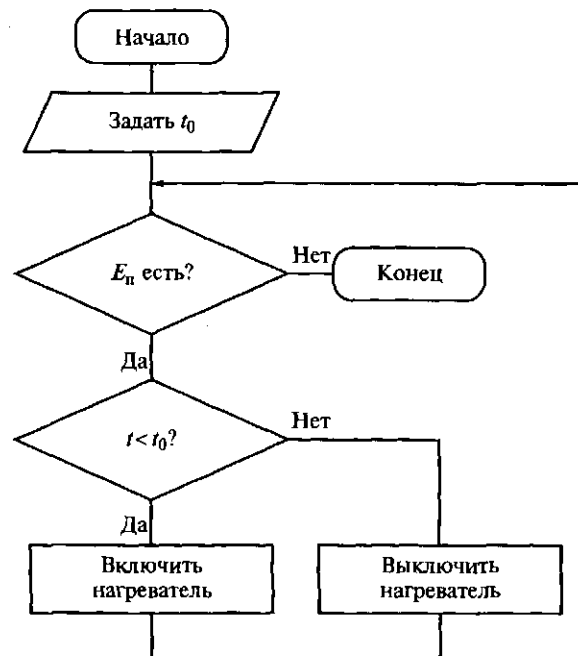


Рис. П.1. Блок-схема алгоритма поддержания температуры объекта

условия повторения цикла можно выбрать наличие напряжения  $E_{\text{п}}$  питания технических средств.

Словесная запись алгоритма решения задачи выглядит так:

- 1) ввести значение  $t_0$ ;
- 2) пока есть напряжение  $E_{\text{п}}$ , выполнять действия;
- 3) если  $t < t_0$ , включить нагреватель;
- 4) иначе выключить нагреватель;
- 5) конец ветвления;
- 6) конец цикла.

Блок-схема этого алгоритма приведена на рис. П.1.

После задания требуемого значения температуры  $t_0$  проверяется наличие напряжения питания  $E_{\text{п}}$ . При его наличии сигнал, несущий информацию о текущей температуре  $t$  объекта, сравнивается с сигналом, содержащим информацию о заданном значении температуры  $t_0$ . Если температура объекта ниже заданной, выдается команда включения нагревателя, после чего снова проверяется наличие напряжения питания, сравниваются температуры и т. д.

Когда температура объекта достигает заданного значения (т. е. нарушается условие  $t < t_0$ ), выдается команда выключения нагревателя, затем снова проверяется наличие напряжения питания, сравниваются температуры и т. д.

При отключении напряжения питания  $E_{\text{п}}$  выполнение алгоритма заканчивается.

Из логики алгоритма видно, что для его реализации необходимы следующие устройства:

- задающее значение  $t_0$ , обычно в виде электрического напряжения (задатчик);
- определяющее наличие напряжения  $E_{\text{п}}$ . Отсутствие этого напряжения должно, согласно алгоритму, прекращать работу нагревателя и других технических средств. Однако отключение питания технических средств естественно приводит к прекращению их работы, поэтому отдельное устройство для определения наличия  $E_{\text{п}}$  не требуется;
- несущее информацию о температуре  $t$  объекта (датчик температуры);
- сравнения сигналов, несущих информацию о значениях  $t$  и  $t_0$  (компаратор);
- включающее и выключающее нагреватель (реле).

Схема реализации рассматриваемого алгоритма отдельными электронными устройствами приведена на рис. П.2.

Сравнение сигналов  $U_t$  от датчика температуры ДТ и  $U_{t_0}$  от задатчика З производится компаратором К, в качестве которого используется операционный усилитель. При  $U_t < U_{t_0}$  ( $t < t_0$ ) на выход компаратора проходит напряжение питания положительной полярности  $+E_{\text{п}}$ . Через обмотку реле Р течет ток, контакты реле замыкаются и включают нагреватель Н.

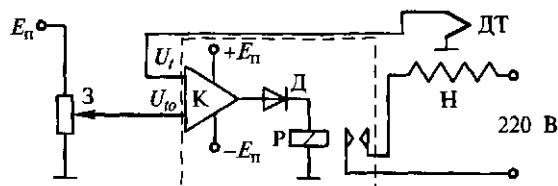


Рис. П.2. Схема системы поддержания температуры объекта

Когда  $U_i$  превысит  $U_{то}$ , полярность напряжения на выходе компаратора становится отрицательной, диод  $D$  не пропускает ток в обмотку реле, контакты реле размыкаются и выключают нагреватель. По мере остывания объекта в какой-то момент  $U_i$  снова становится меньше  $U_{то}$ , и процесс повторяется. При отключении напряжения питания  $E_n$  реле обесточивается, его контакты остаются в разомкнутом состоянии, и нагрев объекта больше не производится.

Современные автоматические системы реализуются на базе микропроцессорных устройств управления (МУУ). Такое устройство может одновременно управлять многими процессами, и в частности, выполнять функции электронных устройств (на рис. П.2 обведены пунктирной линией).

Примером может служить программируемое реле (ПР) семейства LOGO! фирмы Siemens, которое является упрощенным вариантом программируемого контроллера и отличается от него тем, что не формирует на своих выходах аналоговых сигналов управления.

Программируемое реле имеет восемь дискретных входов ( $I1 \dots I8$ ), два из которых ( $I7$  и  $I8$ ) могут использоваться как аналоговые входы ( $A11$  и  $A12$ ), и четыре дискретных выхода ( $Q1 \dots Q4$ ). Подключением блоков расширения можно увеличить количество входов и выходов до требуемого.

Для работы ПР в его микропроцессор должна быть введена коммутационная программа, представляющая собой схему соединения встроенных в реле функциональных блоков, выполняющих или логические (И, ИЛИ, НЕ и др.), или специальные функции (генерирование импульсов, задержка импульсов, усиление аналоговых сигналов, сравнение их значений и др.). Программа составляется на основе алгоритма, который предстоит выполнить подключенным к выходам ПР исполнительным механизмам.

Функциональные блоки отображаются на экране ПР их символьными обозначениями, а соединения между блоками задаются выбором на экране нужных входов (выходов) нужных блоков. Входы встроенных в реле блоков обозначаются  $In$  (дискретный вход) или  $A$  (аналоговый вход).

В число встроенных функциональных блоков ПР LOGO!, выполняющих специальные функции, входит аналоговый компаратор.

Коммутационная схема, выполняющая функции устройств, показанных на рис. П.2, приведена на рис. П.3. Она включает аналоговый компаратор,

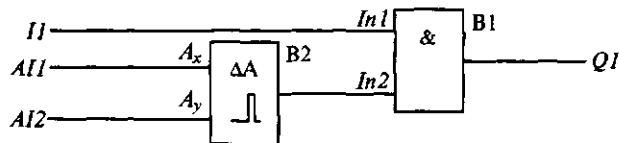


Рис. П.3. Коммутационная программа системы поддержания температуры объекта

обозначаемый на коммутационных схемах LOGO!  $\Delta A$ , и логический блок И, обозначенный знаком  $\&$ .

На дискретный вход  $I1$  подается напряжение  $E_n$ , на аналоговый вход  $AI1$  поступает напряжение от датчика температуры, а на второй аналоговый вход  $AI2$  — сигнал от задатчика. К выходу  $Q1$  подключается нагреватель.

Работа системы проходит точно так же, как и при применении отдельных электронных устройств. Сигнал 1 (положительный уровень напряжения) на выходе компаратора устанавливается, когда входной сигнал  $A_x$  меньше сигнала  $A_y$ , и снимается, когда  $A_x$  становится больше  $A_y$ . Для прохождения сигнала 1 через блок И на выход  $Q1$  на втором входе блока И тоже должен быть сигнал 1, т. е. должно присутствовать напряжение питания  $E_n$ . При его отсутствии на выходе блока И всегда будет 0, т. е. нагреватель останется выключенным.

Преимущество применения МУУ состоит в том, что в него можно ввести множество программ, реализующих самые различные алгоритмы. При любом изменении алгоритмов достаточно изменить нужную программу через пульт управления ПР или через подключенный к ПР компьютер. При этом в схемах соединения ПР с датчиками и исполнительными устройствами никаких изменений делать не нужно.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Дорогой читатель!.....	3
Предисловие.....	4
<b>Глава 1. Автоматизация производства и технический прогресс.....</b>	<b>5</b>
1.1. Основные понятия.....	5
1.2. Системы автоматизации технологических процессов.....	9
1.3. Управление технологическими процессами.....	11
<b>Глава 2. Алгоритмы.....</b>	<b>14</b>
2.1. Понятие алгоритма.....	14
2.2. Виды алгоритмов.....	17
2.2.1. Линейные алгоритмы.....	17
2.2.2. Алгоритмы с ветвлением.....	17
2.2.3. Циклические алгоритмы.....	20
2.2.4. Вспомогательные алгоритмы.....	24
2.3. Способы записи алгоритмов.....	27
2.3.1. Словесная запись.....	27
2.3.2. Графическое представление.....	27
2.3.3. Алгоритмический язык.....	34
<b>Глава 3. Автоматические системы контроля, управления и регулирования.....</b>	<b>40</b>
3.1. Основные понятия и определения.....	40
3.1.1. Процессы.....	40
3.1.2. Управление.....	41
3.1.3. Сигналы.....	43
3.1.4. Исполнительные механизмы.....	47
3.1.5. Датчики.....	48
3.1.6. Каналы связи.....	49
3.1.7. Типы автоматических систем.....	51
3.2. Системы автоматического контроля.....	53
3.2.1. Контролируемые параметры.....	53
3.2.2. Алгоритм системы автоматического контроля.....	55
3.2.3. Технические средства контроля параметров.....	58
3.3. Системы автоматического управления.....	63
3.3.1. Алгоритм системы автоматического управления.....	63
3.3.2. Технические средства управления.....	66
3.4. Системы автоматического регулирования.....	69
3.4.1. Принципы регулирования.....	69
3.4.2. Устойчивость систем автоматического регулирования.....	72
3.4.3. Характеристики звеньев САР.....	73

Глава 4. Датчики.....	83
4.1. Основные характеристики датчиков.....	83
4.2. Датчики технологических параметров.....	87
4.2.1. Общие сведения.....	87
4.2.2. Первичные механические преобразователи.....	88
4.2.3. Датчики линейных и угловых перемещений.....	91
4.2.4. Датчики скорости.....	101
4.2.5. Датчики деформации.....	102
4.2.6. Датчики силы.....	103
4.2.7. Датчики температуры.....	104
4.2.8. Датчики дискретных параметров.....	107
Глава 5. Устройства преобразования сигналов.....	111
5.1. Переходные устройства.....	112
5.2. Устройства нормализации сигналов.....	116
5.2.1. Общие сведения.....	116
5.2.2. Фильтры.....	116
5.2.3. Преобразователи тока в напряжение.....	117
5.2.4. Атенюаторы.....	118
5.2.5. Мостовые измерительные цепи.....	118
5.3. Усилители.....	120
5.4. Цифровые устройства.....	126
5.4.1. Общие сведения.....	126
5.4.2. Триггеры.....	127
5.4.3. Регистры.....	128
5.4.4. Счетчики.....	129
5.4.5. Коммутаторы.....	131
5.5. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи.....	133
5.5.1. Цифроаналоговые преобразователи.....	133
5.5.2. Квантование по времени и квантование по уровню.....	135
5.5.3. Аналого-цифровые преобразователи.....	137
Глава 6. Исполнительные механизмы.....	142
6.1. Виды исполнительных механизмов.....	142
6.2. Электромеханические исполнительные механизмы.....	144
6.2.1. Электродвигатели.....	144
6.2.2. Электромагнитные муфты.....	156
6.2.3. Электромагниты и реле.....	159
6.3. Электропневматические и электрогидравлические исполнительные механизмы.....	162
6.3.1. Электропневматические исполнительные механизмы.....	162
6.3.2. Электрогидравлические исполнительные механизмы.....	165
Глава 7. Устройства управления автоматическими системами.....	167
7.1. Устройства управления с «жесткой» логикой.....	167
7.1.1. Линейные процессы.....	167
7.1.2. Командоаппараты без обратной связи.....	169
7.1.3. Командоаппараты с обратной связью.....	171
7.2. Микропроцессорные управляющие устройства.....	171



7.3. ЭВМ в системах управления .....	177
7.4. Программное обеспечение систем контроля и управления.....	179
7.5. Сопряжение ЭВМ с объектом управления .....	183
<b>Глава 8. Гибкие автоматизированные производства</b> <b>и робототехнические системы .....</b>	<b>189</b>
8.1. Гибкие производственные системы .....	189
8.1.1. Жесткие и гибкие системы.....	189
8.1.2. Структура ГАП .....	192
8.2. Роботы и робототехнические системы.....	194
Приложение .....	200
Список литературы .....	198

*Учебное издание*

**Пантелеев Владимир Николаевич,  
Прошин Владимир Михайлович**

**Основы автоматизации производства**

**Учебник**

7-е издание, исправленное

Редакторы *И. В. Мочалова, Е. Н. Соколова*  
Технический редактор *Н. И. Горбачева*  
Компьютерная верстка: *Н. В. Протасова*  
Корректор *А. П. Сизова*

Изд. № 107112587. Подписано в печать 09.07.2015. Формат 60 × 90/16.  
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Бумага офс. № 1.  
Усл. печ. л. 13,0. Тираж 1 200 экз. Заказ № 4850.

ООО «Издательский центр «Академия». [www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)  
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.  
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16679 от 25.05.2015.

Отпечатано в АО «Первая Образцовая типография»,  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ». 432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

Для подготовки квалифицированных кадров по профессиям технического профиля рекомендуются следующие учебники и учебные пособия:

- В. Н. Пантелеев, В. М. Прошин  
**Основы автоматизации производства.  
Лабораторные работы**
- В. Н. Пантелеев, В. М. Прошин  
**Основы автоматизации производства.  
Рабочая тетрадь к лабораторным работам**
- В. Н. Пантелеев, В. М. Прошин  
**Основы автоматизации производства.  
Контрольные материалы**
- И. С. Опарин  
**Основы технической механики**

# ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА



Издательский центр «Академия»  
[www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)