

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

В. А. Рогов, А. Д. Чудаков

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

УЧЕБНИК
2-е издание



МО рекомендует

УМО ВО
РЕКОМЕНДУЕТ

 **Юрайт**
ПРАКТИКУМ

В. А. Рогов, А. Д. Чудаков

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ

2-е издание, исправленное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям



Курс с практическими заданиями и дополнительными материалами доступен на образовательной платформе «Юрайт», а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»

Москва • Юрайт • 2024

УДК 621(075.8)

ББК 34.4я73

P59

Авторы:

Рогов Владимир Александрович — доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, заведующий Инженерной академией Департамента машиностроения и приборостроения Российского университета дружбы народов;

Чудаков Александр Давидович — доктор технических наук, профессор.

Рецензенты:

Шандров Б. В. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Московского государственного технического университета «МАМИ»;

Гришин В. М. — доктор технических наук, профессор.

Рогов, В. А.

P59 Средства автоматизации и управления : учебник для вузов / В. А. Рогов, А. Д. Чудаков. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 352 с. — (Высшее образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-09060-4

В учебнике изложены принципы применения информационных технологий в механообработке, рассмотрены датчики параметров технологических процессов, методы и устройства для переработки полученной информации с целью ее использования для управления ходом производственного процесса и его автоматизации.

Содержание учебника соответствует актуальным требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям, а также специалистов, занимающихся практической инженерной и экономической деятельностью.

УДК 621(075.8)

ББК 34.4я73

Разыскиваем правообладателей и наследников Чудакова А. Д.:

<https://www.urait.ru/inform>

Обратитесь, пожалуйста, в поддержку: +7 (495) 744-00-12; e-mail: gred@urait.ru

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-09060-4

© Рогов В. А., Чудаков А. Д., 2005

© Рогов В. А., Чудаков А. Д., 2016,

с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2024

Оглавление

Предисловие	7
Введение. Задачи получения, обработки и использования информации в машиностроении	9

Раздел I ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНООБРАБОТКИ

Глава 1. Общие принципы построения датчиков параметров механообработки	12
§ 1.1. Классификация датчиков и основные определения.....	12
§ 1.2. Статические и динамические характеристики датчиков	17
§ 1.3. Типовые виды воздействия на датчики	22
§ 1.4. Понятие чувствительности, точности и диапазона измерений	26
<i>Контрольные вопросы</i>	31
Глава 2. Резистивные датчики	33
§ 2.1. Электроконтактные датчики	33
§ 2.2. Пневмоэлектроконтактные датчики	36
§ 2.3. Реостатные датчики и контактные датчики сопротивления	38
§ 2.4. Тензодатчики (тензорезисторы)	43
§ 2.5. Терморезисторы, термопары и магниторезистивные датчики	47
<i>Контрольные вопросы</i>	51
Глава 3. Пьезоэлектрические датчики и преобразователи, основанные на эффекте Холла	54
§ 3.1. Физические явления при пьезоэффекте	54
§ 3.2. Конструктивные принципы построения пьезодатчиков	57
§ 3.3. Эффект Холла и его использование для построения датчиков.....	60
§ 3.4. Области рационального применения пьезоэлектрических датчиков и датчиков, использующих эффект Холла.....	63
<i>Контрольные вопросы</i>	65
Глава 4. Емкостные преобразователи	67
§ 4.1. Физические принципы построения емкостных преобразователей.....	67
§ 4.2. Конструктивные принципы построения емкостных датчиков механических величин	70
§ 4.3. Конструктивные принципы построения емкостных датчиков уровня жидкости.....	73

§ 4.4. Конструктивные принципы построения емкостных датчиков параметров среды	75
<i>Контрольные вопросы</i>	78
Глава 5. Оптоэлектронные преобразователи	80
§ 5.1. Основные свойства оптического излучения	80
§ 5.2. Источники и приемники излучения	83
§ 5.3. Волоконная оптика	90
§ 5.4. Основные конструктивные схемы оптоэлектронных преобразователей	93
<i>Контрольные вопросы</i>	100
Глава 6. Электромагнитные преобразователи	102
§ 6.1. Общие положения	102
§ 6.2. Индуктивные преобразователи	105
§ 6.3. Вихретоковые и магнитоупругие преобразователи	111
§ 6.4. Вращающиеся трансформаторы и резольверы, линейные и круговые индуктосины	114
<i>Контрольные вопросы</i>	118

Раздел II ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНООБРАБОТКОЙ

Глава 7. Усилительные устройства	122
§ 7.1. Общие понятия процесса усиления	122
§ 7.2. Электронные усилители	126
§ 7.3. Магнитные усилители	131
§ 7.4. Электромашинные усилители	134
<i>Контрольные вопросы</i>	139
Глава 8. Переключательные устройства	141
§ 8.1. Общие характеристики релейных элементов	141
§ 8.2. Электромагнитные контактные реле	146
§ 8.3. Бесконтактные электрические логические элементы	151
§ 8.4. Гидравлические и пневматические релейные элементы	156
<i>Контрольные вопросы</i>	158
Глава 9. Триггерные устройства	161
§ 9.1. Устройство и работа электронного триггера	161
§ 9.2. Триггерные цепочки	164
§ 9.3. Двоичные и десятичные пересчетные схемы	168
§ 9.4. Схемы счета до заданного числа	172
<i>Контрольные вопросы</i>	174
Глава 10. Ввод и преобразование информации в схемах управления механообработкой	176
§ 10.1. Схемы включения измерительных датчиков в цепи измерения и управления	176
§ 10.2. Преобразователи информации с кодовыми масками	180

§ 10.3. Помехозащищенное кодирование информации.....	183
§ 10.4. Преобразования кодов в системах обработки информации	187
Контрольные вопросы.....	191
Глава 11. Преобразование аналоговой информации	
в цифровую и наоборот.....	193
§ 11.1. Квантование информации по времени и по уровню	193
§ 11.2. Аналого-цифровые преобразователи	196
§ 11.3. Цифроаналоговые преобразователи	200
§ 11.4. Компьютеры в цепях управления параметрами механообработки ...	204
Контрольные вопросы.....	209
Глава 12. Исполнительные механизмы в цепях управления	
механообработкой	212
§ 12.1. Общие требования к приводам подач, приводам главного движения и вспомогательным механизмам механообрабатывающих станков	212
§ 12.2. Регулируемые электрические двигатели и другие исполнительные устройства	216
§ 12.3. Гидравлические исполнительные механизмы	221
§ 12.4. Пневматические исполнительные механизмы	225
Контрольные вопросы.....	230
Раздел III	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕХАНООБРАБОТКИ	
Глава 13. Общие принципы построения систем	
автоматизации механообработки.....	234
§ 13.1. Принципы компенсации и отклонения	234
§ 13.2. Замкнутые, разомкнутые и другие системы автоматизации	238
§ 13.3. Статические и астатические, устойчивые и неустойчивые системы автоматизации.....	242
§ 13.4. Корректирующие устройства в системах автоматизации	247
Контрольные вопросы.....	250
Глава 14. Системы автоматического копирования.....	252
§ 14.1. Станки-автоматы с непосредственным моделированием перемещений рабочих органов	252
§ 14.2. Станки-автоматы с усилителями мощности	255
§ 14.3. Автоколебания в системах с усилителями мощности.....	258
§ 14.4. Методы исследования и устранения автоколебаний в системах с усилителями мощности	262
Контрольные вопросы.....	264
Глава 15. Автоматические циклы в механообработке	266
§ 15.1. Механообрабатывающее оборудование циклического действия	266
§ 15.2. Задание исходных технологических данных для автоматических циклов управления механообработкой.....	271

§ 15.3. Автоматические циклы в функции пути и в функции времени.....	276
§ 15.4. Релейно-контактные схемы для обеспечения автоматических циклов.....	280
Контрольные вопросы.....	285
Глава 16. Реализация информационных технологий на базе программируемых командоконтроллеров	288
§ 16.1. Архитектурные принципы построения программируемых командоконтроллеров.....	288
§ 16.2. Привязка программируемых командоконтроллеров к конкретному оборудованию механообработки	291
§ 16.3. Локальные сети из программируемых командоконтроллеров.....	295
§ 16.4. Мониторинг оборудования с автоматическим циклом	298
Контрольные вопросы.....	302
Глава 17. Числовое программное управление станками.....	305
§ 17.1. Общая структура системы числового программного управления (ЧПУ) механообрабатывающим станком.....	305
§ 17.2. Рабочие режимы в механообрабатывающих станках с ЧПУ	310
§ 17.3. Управляющие программы для станков с ЧПУ	314
§ 17.4. Автоматизация технологической подготовки и программирования для станков с ЧПУ	316
Контрольные вопросы.....	321
Глава 18. Управление комплексами механообрабатывающего оборудования.....	323
§ 18.1. Производство деталей одного наименования с помощью традиционных автоматических линий.....	323
§ 18.2. Закрытые и открытые технологические семейства деталей	327
§ 18.3. Автоматизация диспетчерского управления процессами механообработки	330
§ 18.4. Организационно-технологическое управление многономенклатурным производством	334
Контрольные вопросы.....	338
Краткий словарь терминов	341
Рекомендуемая литература	349
Новые издания по дисциплине «Средства автоматизации и управления» и смежным дисциплинам.....	351

Предисловие

В условиях рыночной экономики и неизбежной конкуренции получение производственной информации и ее обработка с применением компьютерной техники приобретают все большее значение. Правильно проводимая техническая политика позволяет производителю наиболее эффективно построить технологический процесс, снижая тем самым производственные затраты и увеличивая реальную прибыль. Наоборот, ошибки в проведении научно-технической политики могут привести к отрицательным результатам, которые не поддаются исправлению.

Техническую политику в производстве машиностроительной продукции должны проводить специалисты, владеющие всем арсеналом теоретических знаний и практического опыта, относящимся к этим вопросам. Отсюда — потребность в литературе, освещающей методы получения, переработки и использования информации, относящейся к реализации технологического процесса. Такая информация необходима для построения технологического оборудования и организации производства. Настоящая книга содержит в сконцентрированном виде сведения по соответствующей тематике.

В конце каждой главы даны контрольные вопросы, позволяющие читателю проводить самопроверку усвоения изложенного материала. В конце книги помещен краткий словарь терминов, относящихся к получению, обработке и использованию технологической информации.

Авторы надеются, что данная книга найдет своего читателя среди студентов и аспирантов технологических и экономических специальностей, а также среди специалистов, занимающихся практической инженерной и экономической деятельностью.

В результате изучения материалов учебника студент будет:

знать

- основные архитектуры систем автоматизации в управлении, подходы к проектированию систем, характеристики систем;
- средства автоматизации процессов управления;
- средства и системы программирования промышленных контроллеров;

уметь

- конфигурировать комплексы технических средств на основе компьютеров, промышленных контроллеров и датчикового оборудования с учетом их совместимости;

- производить оценку основных характеристик систем и средств управления, надежности систем;
- осуществлять синтез систем управления электроэнергетикой, обеспечивающих требуемые динамические характеристики;
- на основании проведенного анализа принимать рациональные схемотехнические решения по созданию систем управления;

владеть

- навыками расчета, используемыми в процессе проектирования систем и средств управления;
- навыками программирования, отладки и тестирования промышленных контроллеров;
- навыками и опытом комплектования программно-аппаратных комплексов автоматизации управления.

Введение.

Задачи получения, обработки и использования информации в машиностроении

Все стороны деятельности человеческого общества связаны с необходимостью измерения тех или иных физических величин: веса, времени, размеров, расстояний и перемещений — и сопровождаются созданием и совершенствованием методов и приборов для измерения этих величин.

Научно-технический прогресс напрямую зависит от возможности получения информации о параметрах производственного процесса, методов ее переработки и использования полученных результатов. Это относится как к задачам исследования и моделирования, так и к задачам слежения за ходом производственного процесса и управления им в требуемом направлении.

Тенденция индивидуализации производства и повышение требований к качеству отдельных деталей и изделий машиностроения в целом делают особенно актуальными получение и переработку производственной информации.

В современных системах получения, переработки и использования информации, применяемых в научных исследованиях и производстве, должны соблюдаться следующие основные принципы.

Принцип системности, который заключается в том, что при создании, эксплуатации и развитии подобных систем между их структурными элементами должны быть установлены и сохраняться связи, обеспечивающие целостность данной системы.

Принцип развиваемости, который состоит в том, что должна быть предусмотрена возможность пополнения и видоизменения функций получения, переработки и использования технологической информации, технического, математического, организационного и других видов обеспечения путем доработки и настройки имеющихся технических и программных средств.

Принцип совместимости, который состоит в обеспечении возможности взаимодействия различных компонентов систем получения, переработки и использования технологической информации в процессе их совместного функционирования.

Принцип стандартизации и унификации, который состоит в максимальном применении типовых, унифицированных и стандартных

устройств и методов при построении систем получения, переработки и использования технологической информации.

Принцип эффективности, который состоит в обеспечении рационального соотношения между затратами труда, времени и других видов ресурсов, необходимых для создания системы получения, переработки и использования технологической информации, и результатами ее внедрения и функционирования, будь то исследовательская установка или производственный процесс.

Сложившийся опыт построения систем разных масштабов с различными степенями автоматизации сделал общепринятым иерархический принцип построения подобных систем. Это относится как к информационной и функциональной, так и к технической, алгоритмической, программной и организационной структурам. В соответствии с иерархическим принципом вся система разделяется (в логическом смысле) на уровни (страты), причем информационное взаимодействие происходит только между соседними уровнями. При соблюдении иерархичности построения подобных систем обеспечивается повышение их живучести, поскольку при выходе из строя верхних уровней иерархии нижние уровни, непосредственно взаимодействующие с оборудованием и/или с персоналом, сохраняют свою работоспособность. Эти нижние уровни иерархии продолжают действовать в пределах своей компетенции и в течение времени своей автономности, а вся система продолжает функционировать, хотя и с меньшим уровнем автоматизации.

Таким образом, создается единая схема информационной технологии. В перспективе предполагается распространить ее на все сферы и уровни производственно-сбытовой деятельности, включая менеджмент высшего звена управления. В зарубежной терминологии производства, функционально объединяемые в единое целое с помощью различных компьютерных средств, получили название компьютеризованных интегрированных производств (CIM — Computer Integrated Manufacturing). В них происходит объединение (интеграция) сферы информационной технологии и сферы материального производства. Такие компьютеризованные предприятия призваны обеспечить эффективность производственно-сбытовой деятельности при позаказном формировании производственной программы.

Раздел I
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ
ПАРАМЕТРОВ
МЕХАНООБРАБОТКИ

Глава 1

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНООБРАБОТКИ

§ 1.1. Классификация датчиков и основные определения

Все большее применение в промышленности находят системы автоматизации исследований и обработки экспериментальных данных, а также автоматизации управления технологическими и производственными процессами. Такие системы основываются на получении, преобразовании и обработке информации о текущих значениях параметров, характеризующих состояние объекта исследования или управления. Задачу получения этой информации и ее преобразования в форму, удобную для дальнейшего использования, решают приборы и устройства, объединяемые в измерительные системы.

Современное состояние измерительной техники позволяет контролировать около двух сотен физических величин различной природы — механических, тепловых, электрических, магнитных, акустических и др. Практически большая часть этих величин в процессе измерения преобразуется в электрический сигнал, который наиболее удобно преобразовывать, передавать на большие расстояния, усиливать и подвергать различным функциональным преобразованиям. Однако применяется также преобразование в пневматические и гидравлические сигналы, так как в машиностроении именно пневматические и гидравлические аппараты часто используются для построения систем автоматизации и управления.

Измерения осуществляются с помощью *измерительных преобразователей*, использующих те или иные физические принципы.

На объект измерения обычно выносится *датчик*, который состоит из одного или нескольких измерительных преобразователей. Датчик — это устройство, воспринимающее измеряемый параметр и вырабатывающее соответствующий сигнал с целью передачи его для дальнейшего использования или регистрации. Часто в технической литературе понятия датчиков и измерительных преобразователей между собой не разделяют и измерительные преобразователи называют просто датчиками. Хотя с принципиальной точки зрения понятия измерительного преобразователя и датчика совпадают, но с инженерной точки

зрения под датчиком обычно понимают измерительный преобразователь, заключенный в корпус, снабженный устройствами для установки и фиксации на объекте и кабелем для передачи сигнала.

Таким образом, измерительное преобразование представляет собой отражение одной физической величины с помощью другой физической величины или набора таких физических величин. Выполняющий измерительное преобразование датчик работает в реальных условиях эксплуатации, зачастую весьма тяжелых, обусловленных высокими давлениями и температурами при влиянии агрессивных сред. На датчик одновременно действует большое количество параметров, среди которых только один является измеряемой величиной, а все остальные представляют собой внешние параметры, называемые помехами. Каждый датчик должен на фоне помех наилучшим образом реагировать на измеряемую входную величину, вырабатывая соответствующую выходную величину или код выходной величины.

В основу построения датчиков кладутся самые разнообразные физические явления, которые в значительной степени определяют тип датчика и область рационального применения того или иного датчика. Типы датчиков, используемых для измерения различных параметров, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Типы датчиков, применяемых для измерения различных параметров

Параметр Тип датчика	Давление	Перемещение	Положение	Скорость	Ускорение	Вибрация	Температура
Тензорезистор	*	*	*	*	*	*	
Потенциометрический	*	*	*	*	*		
Дифференциальный трансформатор	*	*	*	*	*		
Термопара							*
Емкостный	*	*	*	*	*	*	
Вихревой токовый		*	*	*			
Магниторезистивный		*	*				
Пьезоэлектрический	*	*		*	*	*	
Термистор							*
Термометр сопротивления							*
На эффекте Холла		*	*				

Все измерительные системы параметров процессов механической обработки по используемому принципу измерения можно разделить на два типа: системы с абсолютными датчиками и системы с циклическими датчиками.

В системах первого типа для каждого разряда отсчета обычно используется свой датчик, цена деления которого соответствует данному разряду.

В системах второго типа содержится один циклический датчик (датчик точного отсчета), а результат во всех разрядах формируется путем подсчета числа циклов этого датчика. Характерным примером измерительной системы второго типа может служить датчик общего километража пробега автомобиля или всем известный бытовой счетчик электроэнергии.

Системы первого типа устойчивы к сбоям и перерывам в работе и к непредвиденным колебаниям в напряжении питания и могут успешно функционировать при более высоких скоростях изменения измеряемого параметра. Ошибки отсчета, возникающие в процессе измерений, при дальнейшем нормальном ходе этого процесса автоматически исправляются. В частности, датчики координатных перемещений узлов станка, используемые в различных системах автоматизации, как правило, принадлежат к первой группе. Их еще называют в этом случае *абсолютными* датчиками перемещений.

Системы второго типа обычно конструктивно более просты, но предъявляют более высокие требования к ограничениям скорости изменения измеряемого параметра (чтобы не «проглатывать» показания датчика точного отсчета) и соответственно к скорости считывания и обработки информации. Они также более чувствительны к сбоям и перерывам в работе и к непредвиденным колебаниям в напряжении питания и обладают свойством сохранять временно возникшие ошибки отсчета. Если по этому принципу строятся датчики координатных перемещений узлов станка, используемые в различных системах автоматизации, то их называют *относительными* датчиками перемещений.

По типу *выходной* информации все датчики, используемые для измерения параметров технологических процессов, делятся на *дискретные* (в том числе на импульсные и цифровые) и на *аналоговые* (в том числе датчики с выходом в виде напряжения и в виде сдвига фазы, так называемые фазовые датчики).

По конструкции измерительного устройства и по способу получения *входной* информации датчики параметров технологических процессов можно разделить на *линейные* и *круговые*. В первую очередь это следует отнести к датчикам положения, используемым в различного рода системах автоматизации механообрабатывающих станков, но можно также рассматривать с этих позиций и датчики других параметров.

В системах измерения положения наибольшую достоверность получаемой информации обеспечивают линейные датчики, которые монтируются непосредственно на подвижных узлах станка, переме-

щение которых должно быть измерено. Круговые датчики перемещения обычно устанавливают на каком-либо узле кинематической цепи подачи, обычно на шариковом ходовом винте. Они могут приводиться во вращение также от измерительной рейки через находящееся в зацеплении с ней измерительное зубчатое колесо. В этом случае на точность измерений влияют погрешности кинематической цепи между подвижным узлом и датчиком.

Для построения систем абсолютного отсчета применяют в основном круговые кодовые датчики положения. Линейные датчики положения обычно выдают информацию по одному каналу в виде серии импульсов (в виде так называемого *унитарного кода*), общее число которых пропорционально величине измеряемого перемещения. На основе использования таких датчиков строятся системы относительного отсчета.

С точки зрения источника энергии, используемой для измерения, все датчики можно разделить на *активные* и *пассивные*.

Пассивный, или *параметрический*, датчик изменяет какой-либо из своих параметров под воздействием самой измеряемой величины и требует подключения к какому-либо внешнему источнику энергии, изменяя ее в зависимости от текущего значения измеряемого параметра. Примером подобных датчиков может служить обычный угольный микрофон, изменяющий свое сопротивление в зависимости от воспринимаемых им акустических колебаний.

Активный, или *генераторный*, датчик сам генерирует выходной сигнал за счет энергии измеряемой величины и не требует подключения к внешнему источнику энергии. Примерами датчиков такого рода, которые будут более подробно рассмотрены в дальнейшем, являются различные пьезоэлектрические датчики давления или тахогенераторные датчики скорости вращения.

К параметрическим датчикам, нуждающимся во внешнем источнике энергии, относятся:

- резисторные;
- индуктивные;
- трансформаторные;
- емкостные.

К генераторным датчикам, у которых источник энергии находится в самом датчике, относятся:

- термоэлектрические;
- индукционные;
- пьезоэлектрические;
- фотоэлектрические.

Соответствующая классификация датчиков приведена на рис. 1.1.

Применительно к датчикам используются следующие основные определения и термины.

Функция преобразования измерительного преобразователя — это зависимость выходной величины от входной, описываемая аналитическим выражением, графиком или таблицей.



Рис. 1.1. Классификация датчиков параметров механообработки

Чувствительность преобразователя — это именованная величина, зависящая от природы входной и выходной величин, показывающая, на сколько изменится выходная величина при изменении входной величины на одну единицу. Для термопары единицей чувствительности будет мВ/К, для фотоэлемента — мкА/лм, для двигателя — (об/с)/В, для гальванометра — мм/мкА и т. д.

Чувствительность измерительной системы, состоящей из последовательного ряда измерительных преобразователей, представляет собой произведение чувствительностей всех преобразователей, составляющих канал передачи сигнала.

Разрешающая способность преобразователя — это наименьший сигнал, который может быть измерен преобразователем.

Воспроизводимость указывает на то, насколько близки друг к другу результаты измерения одной и той же физической величины.

Прецизионность указывает на то, насколько близки друг к другу результаты аналогичных измерений, хотя и необязательно одной и той же величины.

Точность измерения показывает, как близко определенное значение параметра к его истинному значению. Обычно точность задается в процентах от *полной* шкалы измерительного прибора. Если, например, прибор, имеющий полную выходную шкалу 100 В, характеризуется паспортной точностью $\pm 2\%$, то это значит, что при любом отсчете стрелка прибора не может отклоняться от истинного значения более чем на ± 2 В. Если прибор показывает 90 В, то истинное значение лежит в пределах от 88 до 92 В. Если же прибор показывает 5 В, то истинное значение измеряемой величины будет лежать в тех же абсолютных пределах, т. е. между 3 и 7 В. Относительная погрешность при этом составит 4/5 или 80 %.

Шумы — это любой сигнал, который не несет полезной информации. Шумы могут быть механическими, магнитными, электрическими и др. Для исключения влияния шумов прибор должен иметь соответствующую защиту. Шумы могут иметь не только внешнее происхождение, но и возникать в самом приборе вследствие недостатков конструкции или ее несоответствия поставленной задаче измерения.

Если прибор используется не по назначению, то возникают **ошибки применения**.

Заметим, что в большинстве случаев при измерении механических величин, таких как усилия и напряжения, нагрузка воспринимается упругим элементом, который под воздействием измеряемой величины деформируется и преобразует эту деформацию в другой вид энергии, чаще всего в электрический сигнал. Входными величинами в таком случае могут быть сосредоточенная сила, крутящий момент, давление газа или жидкости. Выходным сигналом может быть и непосредственно воспринимаемая информация, когда происходящая деформация какого-либо элемента, например пружины, приводит к соответствующему отсчету по шкале.

§ 1.2. Статические и динамические характеристики датчиков

Всякий датчик характеризуется соотношениями между измеряемой величиной и величиной, которую он порождает на выходе в ответ на изменения этой входной величины.

Различают *статическую* и *динамическую* характеристики датчика.

Под статической характеристикой датчика понимают зависимость между установившимися значениями входной и выходной величин.

Под динамической характеристикой датчика понимают поведение выходной величины во время переходного процесса в ответ на мгновенное (ступенчатое) изменение его входной величины.

Если в статической характеристике датчика строится зависимость только между значениями выходной величины Y и входной величины X , то в динамической характеристике датчика участвует также и параметр времени t , и такая характеристика представляет собой зависимость вида $Y = Y(t)$.

Очевидно, что установившееся значение выходной величины датчика представляет собой то значение, которое приобретает его выходная величина после окончания переходных процессов, т. е. при $t \rightarrow \infty$.

Для статической характеристики обычно принято считать желательной прямую пропорциональную зависимость между установившимися значениями входной и выходной величин. Однако это не всегда соблюдается. Зависимость между установившимися значениями входной и выходной величин применительно к датчикам также называют *тарировочной кривой*.

Различные виды статических характеристик измерительных датчиков с пропорциональным выходом приведены на рис. 1.2.

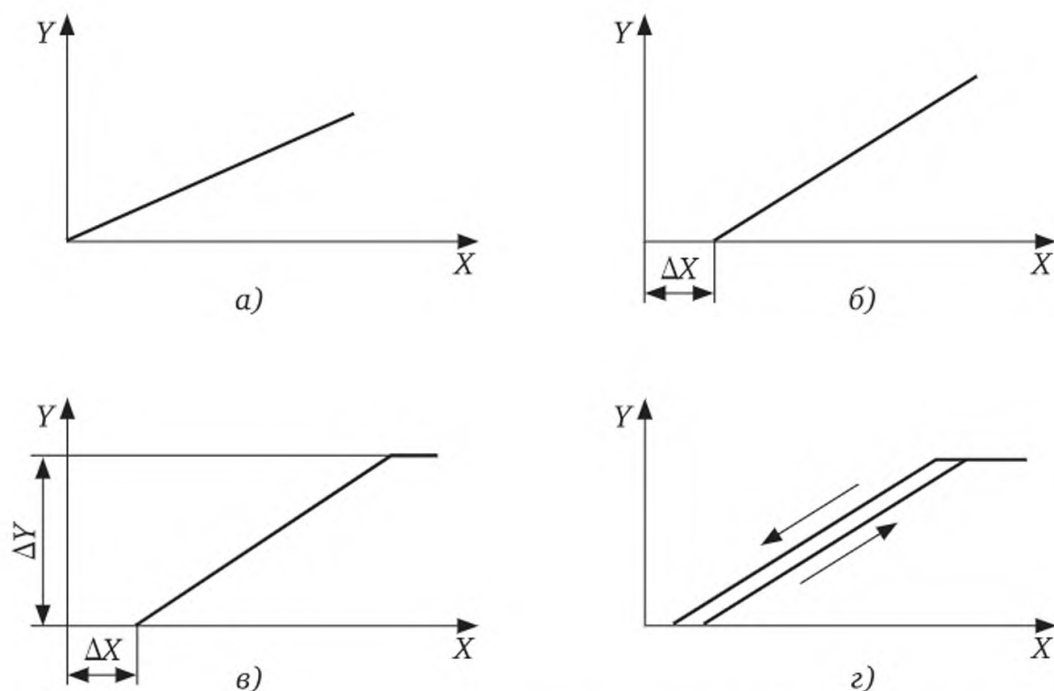


Рис. 1.2. Статические характеристики датчиков с пропорциональным выходом

На рис. 1.2, а приведена идеализированная статическая характеристика датчика, у которого установившееся значение выходной величины пропорционально установившемуся значению входной величины. Нулевому значению входной величины соответствует нулевое значение величины на выходе.

На рис. 1.2, б приведена идеализированная статическая характеристика датчика с зоной нечувствительности. У такого датчика изменение входной величины до значения ΔX , называемого *порогом чувствительности*, не ведет к появлению какого-либо сигнала на выходе. Лишь после того как окажется, что $X \geq \Delta X$, выходная величина будет расти, начиная от нуля, пропорционально изменению входной величины.

На рис. 1.2, в приведена идеализированная статическая характеристика датчика с зоной нечувствительности и насыщением выхода. У такого датчика после достижения порога чувствительности выходная величина растет пропорционально росту входной величины, но до некоторого предельного значения ΔY , которое называется значением *насыщения* выходной величины. После того как окажется, что $Y \geq \Delta Y$, дальнейший рост входной величины X не приводит ни к какому росту Y .

Наконец, на рис. 1.2, г приведена идеализированная статическая характеристика датчика с зоной нечувствительности на входе, с насыщением на выходе и с петлей гистерезиса. Вообще гистерезисом называется различие между характером соответствия выходной величины входной при прямом и обратном ходе изменения входной величины. Практически обычно это выражается в том, что значение выходной величины при возрастании входной величины «отстает» от ее же значе-

ний при убывании входной величины. Разница в значениях X при возрастании и убывании входной величины, при которых на выходе имеет место одно и то же значение, называется *шириной петли гистерезиса*. Если ширина петли гистерезиса настолько велика, что тарировочная кривая датчика заходит в область отрицательных значений входной величины, то это означает, что $Y = 0$ при $X < 0$, а при $X = 0$ имеет место $Y > 0$. В таком случае говорят, что данный элемент обладает «памятью», так как на его выходе остается ненулевое значение и после того, как на его входе установится нулевое значение. Иными словами, наблюдая за состоянием выхода датчика в данный момент, можно сделать заключение о том, что происходило на его входе в предыдущие моменты. Но это будет иметь место лишь в том случае, если перед этим величина на входе осуществила цикл возрастания с последующим убыванием, может быть и до нуля. Если же такого цикла на входе не происходило, то на выходе датчика будет продолжать сохраняться нулевое значение.

Однако в реальной жизни практически не существует датчиков с пропорциональной (линейной) зависимостью между значениями выходной и входной величин. Это значит, что приращение выходной величины в ответ на единичное приращение входной величины не является постоянным во всем интервале изменения измеряемой величины. Может создаться такая ситуация, когда в начале изменения входной величины (при ее малых значениях) произошедшие в ней изменения будут приводить к существенным изменениям выходной величины, а в конце изменения входной величины (при ее больших значениях) произошедшие в ней изменения будут приводить к малым изменениям выходной величины. Может иметь место и обратная картина, т. е. при малых значениях входной величины на выходе датчика будут иметь место малые изменения выходного сигнала, а при больших значениях входной величины — большие изменения выходного сигнала. Так или иначе, статическая характеристика такого датчика должна будет изображаться *нелинейным графиком*. На рис. 1.3, а приведен первый из рассмотренных случаев, а на рис. 1.3, б — второй.

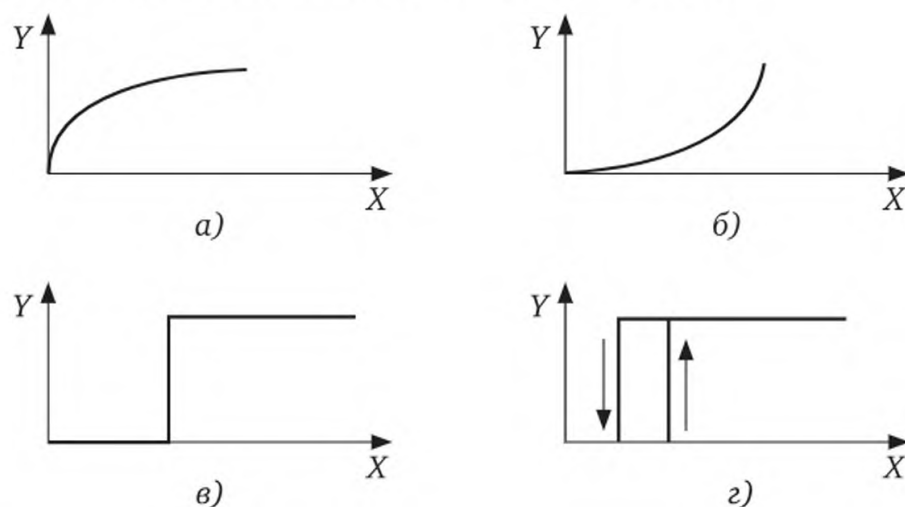


Рис. 1.3. Нелинейные статические характеристики датчиков

В ряде случаев для удобства дальнейшего анализа фактическая нелинейная статическая характеристика датчика в определенных пределах измерения и с определенным влиянием на показания этого датчика может быть приближенно заменена неким линейным эквивалентом. Операция такой замены, по существу, означает разложение нелинейной функциональной зависимости, связывающей выходную и входную величины, в степенной ряд Тейлора с последующим отбрасыванием членов разложения 2-го и более высоких порядков. В определенных условиях такая операция является допустимой, и тогда она носит название *линеаризации*.

Однако в ряде случаев именно нелинейный характер статической характеристики датчика может быть эффективно использован в различных устройствах автоматизации, где применяют датчики со статической характеристикой *релейного* типа. Статическая характеристика релейного типа обладает зоной нечувствительности и насыщением выходной величины при полном отсутствии участка пропорциональности. Это значит, что при возрастании входной величины, до того как она достигнет порога срабатывания, на выходе датчика будет наблюдаться нулевое значение выходной величины, а как только входная величина достигнет порога срабатывания, выходная величина сразу же (скачком) достигнет своей максимальной величины (величины насыщения) и при дальнейшем возрастании входной величины возрастет больше не будет. Примером применения датчика с релейной характеристикой может служить так называемое двухпозиционное регулирование температуры в известном всем домашнем холодильнике. Как только температура внутри холодильника поднимется до заданной величины, датчик температуры подаст сигнал и реле включит электродвигатель, прокачивающий хладагент. При понижении температуры электродвигатель отключается. Идеализированная релейная статическая характеристика приведена на рис. 1.3, в, а релейная статическая характеристика с гистерезисом — на рис. 1.3, г.

Во всех названных случаях рассматривались статические характеристики таких датчиков, у которых входная величина, возрастая и убывая, оставалась тем не менее большей нуля. Как правило, это и имеет фактически место при изменениях параметров технологических процессов производства деталей машиностроения. Например, это характерно при измерении перемещений рабочих органов станков, давления в гидросистемах или температуры в закалочных печах. Однако в ряде случаев, например при измерении фактических отклонений размера детали от номинала, возможно отклонение измеряемой величины как в положительную, так и в отрицательную сторону. Выходная величина при этом может быть пропорциональной модулю входной величины, без гистерезиса или с таковым (рис. 1.4, а, б), либо зависеть таким же образом от самой этой входной величины и ее знака, также без гистерезиса или с таковым (рис. 1.4, в, г). Статические характеристики датчиков для этих случаев (с линейной зависимостью) приведены на рис. 1.4.

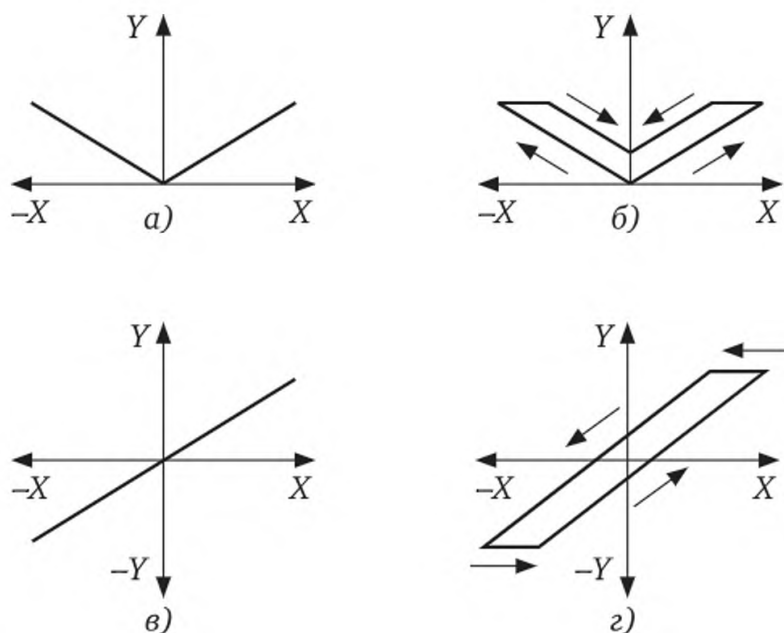


Рис. 1.4. Статические характеристики линейных датчиков с учетом знака изменения входной величины

Все приведенные статические характеристики датчиков отражали зависимость между установившимися значениями входной и выходной величин. Но во время переходного процесса поведение каждого датчика определяется его динамической характеристикой, представляющей зависимость изменения выходной величины от времени, т. е. функцию вида $Y = Y(t)$, при том или ином определенном входном воздействии. Для сравнения динамических характеристик различных датчиков условились считать, что при прочих равных условиях на их входы поступают воздействия одного и того же вида, а именно — ступенчатые. Это означает мгновенный «наброс» входной величины (более подробно это рассматривается в дальнейшем). Практически это соответствует, например, подаче напряжения на электродвигатель (при измерении перемещений) либо помещению термопары в закалочную печь и т. д. Двигатель будет набирать обороты не мгновенно, а в соответствии с динамическими свойствами привода, в который он включен. Точно так же показания термопары начнут отражать температуру в печи не мгновенно, а по мере разогрева ее спая и т. д. Характерные примеры динамических характеристик датчиков приведены на рис. 1.5.

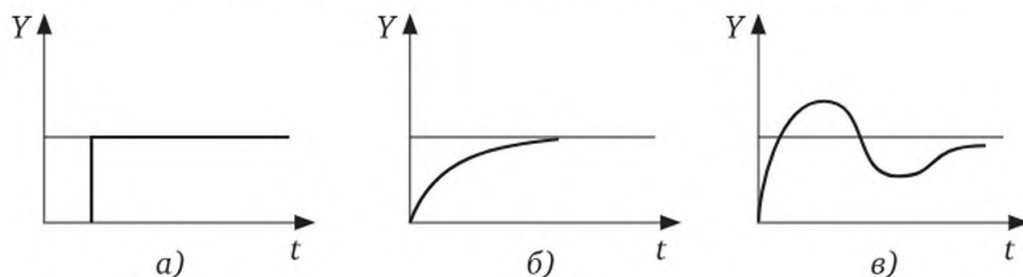


Рис. 1.5. Динамические характеристики датчиков при ступенчатом входном воздействии

Случай, изображенный на рис. 1.5, а, соответствует так называемому *чистому запаздыванию* в датчике, когда его выходная величина просто повторяет в определенном масштабе входную величину, запаздывая по отношению к ней на постоянную величину.

Случай, изображенный на рис. 1.5, б, соответствует так называемому *апериодическому* характеру переходного процесса, когда выходная величина постепенно приближается к новому установившемуся значению монотонным образом (монотонно убывая или, как показано на рисунке, монотонно возрастаая).

Случай, изображенный на рис. 1.5, в, соответствует так называемому *колебательному* характеру переходного процесса, когда выходная величина постепенно приближается к новому установившемуся значению, совершая за время переходного процесса одно или несколько колебаний, превышая на время новое значение выходной величины, а затем возвращаясь к нему.

Динамические процессы в датчиках характеризуются так называемыми *показателями качества переходного процесса*.

К их числу относятся:

- время завершения переходного процесса;
- величина превышения в течение переходного процесса выходного параметра над его новым установившимся значением;
- степень колебательности (число колебаний) переходного процесса.

Используется также так называемый *интегральный показатель качества переходного процесса*, обычно представляющий собой подынтегральную площадь кривой переходного процесса.

§ 1.3. Типовые виды воздействия на датчики

Для испытания датчиков параметров и для получения их статических и динамических характеристик на входы этих датчиков подают типовые воздействия и наблюдают, как испытуемый датчик реагирует на подаваемое воздействие.

К числу таких типовых входных воздействий относятся:

- ступенчатое воздействие;
- ударное (мгновенное) воздействие;
- линейное воздействие;
- гармоническое воздействие.

Рассмотрим эти виды типовых входных воздействий подробнее.

Ступенчатое воздействие — это мгновенное изменение входного параметра на конечную величину. Записывается оно обычно следующим образом: $X = A [1]$. Это означает, что при $t < 0$ $X = 0$, а при $t \geq 0$ $X = A$. Ступенчатое воздействие, при котором величина скачка на входе датчика равна 100 % всей измеряемой величины, называется *единичным воздействием*. График ступенчатого воздействия показан на рис. 1.6.

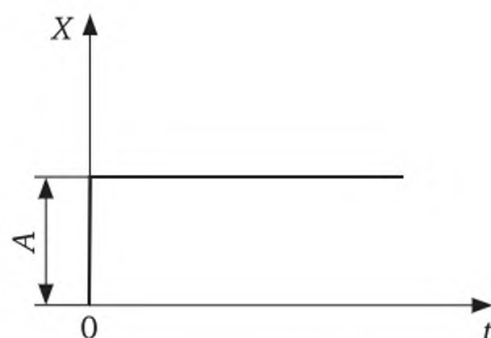


Рис. 1.6. График ступенчатого входного воздействия

Примером ступенчатого воздействия является замыкание или размыкание цепи постоянного тока, приложение или сброс нагрузки с помощью механизма сцепления или управляемой муфты и др. Ступенчатое воздействие является настолько распространенным и важным в инженерной практике, что выходная реакция на воздействие такого рода выделяется среди прочих динамических характеристик и носит специальное название *временной характеристики*.

Заметим, что график ступенчатого входного воздействия, приведенный на рис. 1.6, является идеализированным, поскольку он предполагает «мгновенное» (т. е. за отрезок времени, равный 0) нарастание входной величины от 0 до A . На самом деле такое нарастание потребует отрезка времени $\Delta t \neq 0$. На этом отрезке времени входную величину можно считать нарастающей по линейному закону, что также является идеализацией, а в общем случае такое нарастание происходит по некоему нелинейному закону.

Ударное (мгновенное) воздействие является производной функцией от ступенчатого воздействия. В случае, когда измеряемым параметром является какая-то сила, оно действительно может быть интерпретировано как ударная нагрузка. Ударное воздействие, называемое также δ -функцией, представляет собой «пиковую» нагрузку, которая в пределе имеет стремящуюся к бесконечности ординату при бесконечно малой длительности этой нагрузки ($\Delta t \rightarrow 0$). График ударного входного воздействия, прилагаемого к датчику в момент времени t^* , приведен на рис. 1.7.

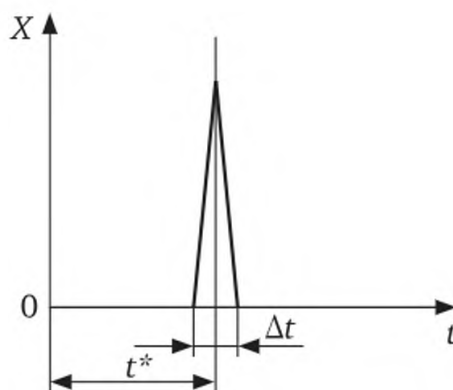


Рис. 1.7. График ударного входного воздействия

Линейное воздействие представляет такое воздействие, при котором входная величина изменяется во времени по линейному (пропорциональному) закону, т. е. $X = Kt$, где K — константа. Этот вид типового воздействия широко применяется при испытаниях следящих систем, т. е. систем, в которых выходной параметр должен «отслеживать» (воспроизводить в том или ином масштабе) некоторую задающую величину, характер изменений которой заранее не predetermined. Характерным примером такого рода является пневмогидравлическая система усиления для рулевого управления тяжелых грузовиков, автобусов, а также высококлассных легковых автомобилей.

Здесь угол поворота направляющих колес автомобиля должен отслеживать поворот рулевого колеса, совершаемый водителем без особого усилия. Другим характерным примером является следящая система гидрокопировального автомата, где перемещение силового поперечного суппорта должно «отслеживать» перемещение задающего копировального щупа, без особой нагрузки взаимодействующего с копиром из легкообрабатываемого материала. Пример линейного входного воздействия приведен на рис. 1.8.

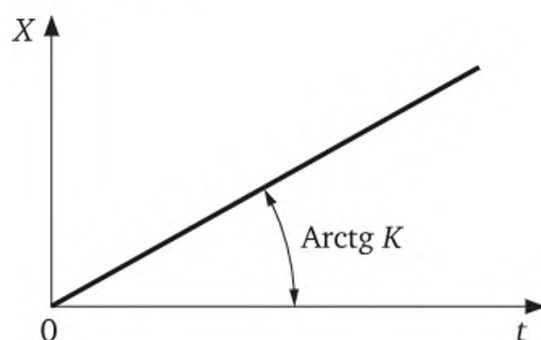


Рис. 1.8. График линейного входного воздействия

Гармоническое воздействие — это такое воздействие, при котором входная величина изменяется по гармоническому закону (т. е. по закону синуса или косинуса). Такое воздействие применяется тогда, когда производится испытание изделия или его компонента с помощью *частотных методов*. Примером такого рода является исследование подвески автомобиля на вибростенде. Существо таких испытаний заключается в том, что исследуемую подвеску «трясут» с изменяющимися частотой и амплитудой и смотрят, что при этом происходит. Другим примером является исследование той или иной электронной схемы с помощью гармонических колебаний, подаваемых от регулируемого задающего генератора колебаний. Целью исследования изделия или его компонентов частотными методами является получение их частотных характеристик.

Частотными характеристиками называются зависимости, связывающие входные и выходные величины линейной системы в установленном режиме, когда подаваемые на ее вход величины изменяются во времени по гармоническому закону. Заметим, что в этом определе-

нии идет речь только о системах (или отдельных устройствах), которые подчиняются линейному закону или могут быть линеаризованы в оговоренных пределах. Обратим также внимание на то, что установившийся режим вовсе не означает неподвижности или неизменности. Это означает лишь, что по истечении времени переходного периода в системе установится режим с неизменяющимися параметрами.

В частности, если на вход такого компонента системы подается гармоническое воздействие вида

$$X(t) = a \sin \omega t$$

с частотой ω и амплитудой a , то через некоторое время, необходимое для завершения переходного процесса, на выходе этого компонента также установятся синусоидальные колебания с той же частотой, но отличные по амплитуде и сдвинутые по фазе по отношению к входу, что записывается следующим соотношением:

$$Y(t) = A \sin(\omega t + \varphi).$$

На комплексной плоскости входная $X(t)$ и выходная $Y(t)$ величины для каждого момента времени t изображаются векторами a и A , проведенными из начала координат под углами ωt и $(\omega t + \varphi)$. Действительные части гармонических входных и выходных величин, представленных в комплексной форме, равны соответственно $a \cos \omega t$ и $A \cos(\omega t + \varphi)$, а мнимые части — $a \sin \omega t$ и $A \sin(\omega t + \varphi)$. Соответствующее графическое изображение представлено на рис. 1.9. На этом рисунке вертикальная ось координат соответствует мнимым частям входной и выходной величин, а горизонтальная ось — их действительным частям.

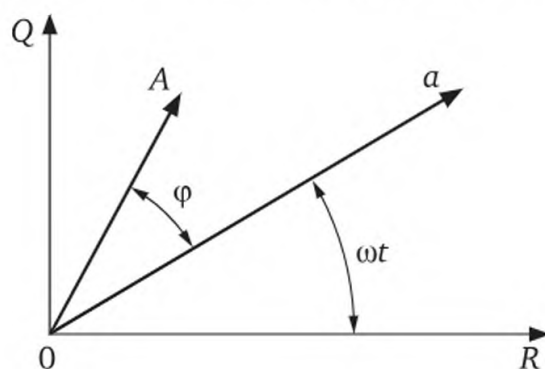


Рис. 1.9. Изображения входной и выходной величин на комплексной плоскости

При подаче на вход датчика гармонического воздействия можно записать в тригонометрической форме для каждого момента времени:

$$X(t) = a(\cos \omega t + j \sin \omega t); Y(t) = A[\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)].$$

По формуле Эйлера тригонометрической форме записи комплексного числа соответствует его запись в показательной форме:

$$(\cos \omega t + j \sin \omega t) = \exp j\omega t.$$

Тогда можно записать:

$$X(t) = a \exp j\omega t; Y(t) = A \exp j(\omega t + \varphi).$$

Обозначив $Y(t) / X(t) = W(j\omega)$, получим

$$W(j\omega) = [A \exp j(\omega t + \varphi)] / (a \exp j\omega t) = (A/a) \exp (j\varphi).$$

Отношение амплитуд на выходе и входе и сдвиг фазы сигнала на выходе по отношению к фазе сигнала на входе являются функциями частоты:

$$A/a = f^*(\omega), \varphi = f^{**}(\omega).$$

Отношение $W(j\omega)$ называют *комплексным передаточным коэффициентом*. На комплексной плоскости этот коэффициент графически изображается в виде точки. Расстояние от этой точки до начала координат позволяет найти модуль A выходной величины. Угол между положительным направлением вещественной (т. е. горизонтальной) оси и направлением на эту точку позволяет найти аргумент $(\omega t + \varphi)$ выходной величины. При изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ изменяются и значения модуля (длина отрезка от начала координат до данной точки), и сдвиг фазы φ . Конец отрезка, находящийся в данной точке, будет при этом описывать некоторую кривую, характерную для данного датчика, называемую *годографом*.

Этот годограф называют *амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ)* данного датчика.

Зависимость модуля комплексного передаточного коэффициента W от частоты ω называют *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)* данного датчика.

Наконец, зависимость сдвига фазы φ от частоты ω называют *фазочастотной характеристикой (ФЧХ)* данного датчика.

Заметим, что амплитудно-фазовая характеристика датчика не содержит параметра времени и этим принципиально отличается от временной характеристики этого же датчика. Таким образом, можно еще раз убедиться, что АФХ и следующие из нее АЧХ и ФЧХ относятся только к установившимся режимам.

§ 1.4. Понятие чувствительности, точности и диапазона измерений

Применительно к различного рода датчикам устоялись и используются в инженерной и научной практике термины, отражающие статические и динамические свойства данного датчика. Эти термины приводятся и объясняются ниже.

Диапазон измерений — это разность между максимальным и минимальным установившимися допускаемыми значениями измеряемой величины.

Полоса пропускания датчика — это разность между максимальной и минимальной частотами изменения входной величины, для работы в которой предназначается данный датчик. Если частота изменения входной величины находится за пределами полосы пропускания данного датчика, то будут возникать ошибки, так как датчик не будет следовать за ее изменениями.

Чувствительность датчика, о которой принципиально уже говорилось выше, представляет собой показатель, характеризующий способность датчика реагировать на изменения входной величины. Если при сравнительно небольшом изменении входной величины выходная величина сильно изменяется, то говорят, что данный датчик обладает высокой чувствительностью. И, наоборот, если при достаточно заметном изменении входной величины выходная величина изменяется мало, говорят, что данный датчик обладает невысокой чувствительностью. Таким образом, чувствительность датчика, по существу, представляет собой производную функцию от его статической характеристики. Если статическая характеристика на всем диапазоне измерений представляет собой линейную зависимость, то чувствительность этого датчика на всем этом диапазоне представляет собой постоянную величину. Если же статическая характеристика представляет собой нелинейную зависимость, то чувствительность такого датчика на диапазоне измерений будет переменной величиной. В этом случае следует говорить лишь о чувствительности датчика в данной точке (при данном значении входной величины).

У датчиков со статической характеристикой релейного типа, что следует рассматривать как особый случай нелинейности, на участке изменения входной величины, соответствующем зоне нечувствительности, чувствительность следует считать нулевой.

На этом участке большие изменения входной величины никоим образом не отражаются на значении выходной величины. Нулевой также следует считать чувствительность датчика на участке, соответствующем насыщению выходной величины, так как и здесь большие изменения входной величины никоим образом не отражаются на значении выходной величины. Хотя само это значение выходной величины в результате релейного переключения и оказалось новым, но при дальнейшем увеличении входной величины оно остается постоянным. Зато в момент переключения с одного установившегося значения выходной величины на другое чувствительность датчика должна оказаться бесконечно большой. Это следует из того, что в этом месте статической характеристики очень малое (в пределе — бесконечно малое) изменение величины на входе приводит к большому изменению величины на выходе. В реальности для переключения датчика с релейной статической характеристикой с одного установившегося выходного значения

на другое требуется хотя и малое, но не бесконечно малое изменение входной величины. Поэтому практически в этой точке датчик со статической характеристикой релейного типа обладает очень большой, но не бесконечной чувствительностью.

Датчики с гистерезисом характеризуются различными значениями чувствительности: одним значением чувствительности при «прямом» ходе изменения входной величины и другим значением — при «обратном» ходе.

Сказанное для общего случая нелинейной статической характеристики датчика иллюстрируется на рис. 1.10. На этом графике чувствительность датчика в точке X определяется как отношение изменения величины ΔY на выходе датчика к вызвавшему его изменению величины ΔX на входе датчика. Однако приращение выходной функции ΔY при малых значениях ΔX может быть заменено ее дифференциалом δY , который является приращением прямой линии, касательной к статической характеристике датчика в точке X . Именно таким образом чувствительность датчика определяется как производная функция от его статической характеристики.

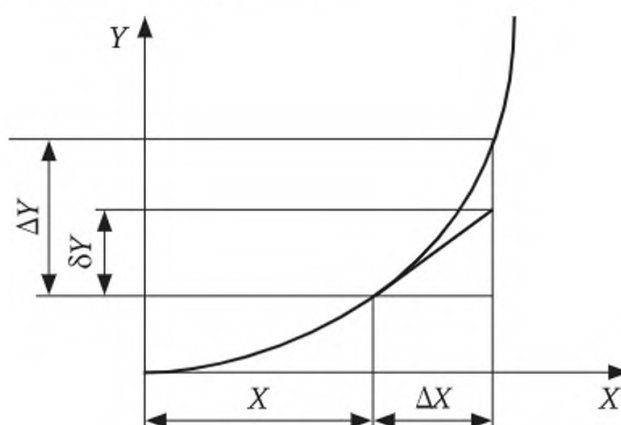


Рис. 1.10. График определения чувствительности датчика

Точность датчика — это, как уже говорилось, характеристика датчика, определяющая, в какой степени величина на выходе датчика приближается к истинному значению величины, поступающей на вход этого датчика. Обычно точность датчика задается в виде допускаемой погрешности, выраженной в процентах от максимального значения измеряемой величины. Этой величиной определяется класс точности соответствующего измерительного прибора.

При изготовлении партии преобразователей каждый из них будет иметь свои параметры, отличающиеся друг от друга. Поэтому в паспорте преобразователя указывается среднее значение той или иной характеристики, называемое номинальным. Разность между фактическим и номинальным значениями характеристики данного датчика составляет его погрешность.

Все погрешности какого-либо датчика разделяются следующим образом:

- систематические;
- прогрессирующие;
- случайные;
- погрешности применения.

Систематическими называются погрешности, которые для данного преобразователя являются постоянными и не зависят от времени. В первую очередь систематические погрешности определяются классом точности преобразователя. Кроме того, они могут возникнуть в результате перенастройки преобразователя. Наличие систематических погрешностей измерения устанавливается путем аттестации и калибровки преобразователя по эталонным приборам.

Систематические погрешности могут возникнуть также тогда, когда режим работы преобразователя не соответствует паспортным рекомендациям, например, при работе в нештатных условиях давления, температуры или же напряжения питания.

Для корректировки и компенсации систематических погрешностей могут быть введены специальные корректирующие устройства, вносящие поправки в показания используемого преобразователя.

Прогрессирующими называются погрешности, величина которых с течением времени эксплуатации постоянно увеличивается. Эти погрешности в основном вызываются процессами старения и износа отдельных частей преобразователей, такими как разрядка источников питания, деформация металлических деталей, износ подшипников, старение резисторов, конденсаторов и транзисторов, усадка бумажной ленты (в самопишущих приборах) и др. Прогрессирующие погрешности могут быть скорректированы и скомпенсированы внесением соответствующих поправок, введением корректирующих звеньев или же заменой износившегося элемента конструкции. Однако такого рода компенсация будет правильной лишь на момент ее внесения, поскольку прогрессирующие погрешности будут возрастать и далее. Если же необходимо получить возможно более точные результаты измерений, то необходимо постоянно оценивать текущее значение погрешностей такого рода и вводить соответствующие поправки. Заметим, что появление прогрессирующих погрешностей представляет собой *нестационарный случайный процесс* и не поддается описанию и прогнозированию на основе теории вероятностей.

Случайными называются погрешности, в появлении которых не удастся установить какой-либо видимой закономерности, так как оно обусловлено сложной совокупностью причин, которые не поддаются анализу. Наличие случайных погрешностей легко обнаруживается при повторных измерениях одной и той же величины, не изменяющей своего значения. Именно из-за случайных погрешностей при этом можно наблюдать некоторый разброс результатов измерений. В большинстве ситуаций появление случайных погрешностей есть *стационарный процесс*. Это значит, что показатели, характеризующие законы распределения их вероятностей, как и сами эти законы, с течением времени

остаются постоянными. Их можно определить на основании уже проведенных измерений, и, используя их, задавать поправки на будущее.

Погрешности применения возникают тогда, когда данный датчик используется не по назначению либо с несоблюдением паспортных рекомендаций. Например, погрешности такого рода возникают, если прибор используется для измерения сигналов, которые не попадают в диапазон измерений или в полосу пропускания. Другим примером является использование таких преобразователей или схем их включения, у которых входное сопротивление измерительной цепи соизмеримо по величине с внутренним сопротивлением измеряемой цепи. Такой преобразователь окажется для измеряемого объекта недопустимой нагрузкой, и его показания не будут совпадать со значениями измеряемой величины, существовавшими в объекте до подключения датчика.

Для получения достоверной информации при проведении научных исследований и вообще измерений, проводящихся вне реального масштаба времени, принято измерять соответствующую физическую величину не менее трех раз, а затем определять среднеарифметическое значение полученных показаний. Это особенно важно, когда при проведении научных исследований устанавливаются зависимости одних величин от других.

Заметим, что в технологических процессах механообрабатывающего производства измерительные преобразователи непосредственно воспринимают только такие механические параметры как перемещение и его производные по времени (скорости и ускорения), а также электрические параметры цепей (токи, напряжения, мощность и др.) и параметры тепловых процессов. Силовые механические параметры, такие как сосредоточенные и распределенные усилия, механические напряжения и деформации, давление жидкостей и газов, воспринимаются не самим преобразователем, а специально выполненным упругим элементом, который под действием измеряемой нагрузки деформируется. Эта деформация воспринимается измерительным преобразователем. Таким образом, входной величиной в данном случае может быть усилие, крутящий момент, давление газа или жидкости, а выходной величиной либо перемещение стрелки, непосредственно воспринимаемое человеком-наблюдателем (например, в динамометрах), либо параметр какого-либо другого вида, большей частью электрический.

Конструкции упругих элементов весьма разнообразны. В динамометрах, которые предназначены для измерения больших усилий (более 10 кН), используются сплошные стержни прямоугольного сечения, работающие на сжатие (рис. 1.11, а) или на сдвиг (рис. 1.11, б). При измерении усилий менее 10 кН используются упругие кольца (рис. 1.11, в) или плоские пружины в виде балок (рис. 1.11, г). При проектировании упругого элемента стремятся, чтобы механические напряжения распределялись по возможности равномерно по всей его поверхности и материал использовался наиболее рационально.

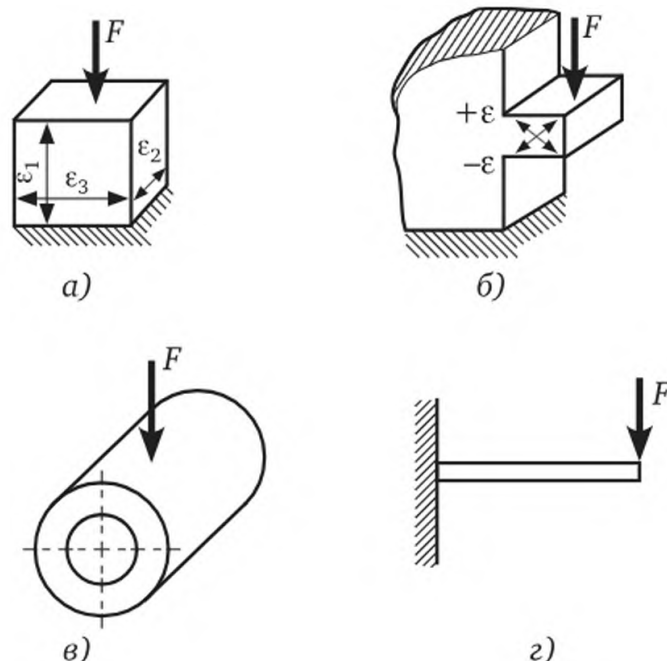


Рис. 1.11. Конструкции упругих элементов для преобразования силы

При измерении крутящих моментов упругие элементы служат для преобразования измеряемого момента в угловое перемещение. В качестве упругих элементов такого рода наибольшее распространение получили различные по конструкции спиральные пружины, сплошные, полые и плоские торсионы, разнообразные подвесы и растяжки.

При измерении давлений также используют весьма разнообразные упругие элементы. К ним относятся плоские и гофрированные мембраны, мембранные коробки, использующие свою собственную жесткость либо опирающиеся на внешнюю плоскую пружину, и др.

В тех случаях, когда упругие элементы должны обладать малой жесткостью, их изготавливают из неметаллов (оргстекла, кварцевых нитей, резиновых компонентов и др.).

Контрольные вопросы

1. Какие параметры контролируются в современных производственных процессах?
2. Что такое измерительный преобразователь и измерительный датчик?
3. Что такое измерительные системы с абсолютным отсчетом?
4. Что такое измерительные системы с относительным отсчетом?
5. Что такое аналоговые датчики и что может служить примером датчиков такого рода?
6. Что такое дискретные датчики и что может служить примером датчиков такого рода?
7. Что такое линейные и круговые датчики и где они применяются в механообработке?
8. Что такое активное и пассивное измерение?
9. Какие существуют разновидности параметрических датчиков?
10. Какие существуют разновидности генераторных датчиков?

11. Что такое чувствительность измерительного преобразователя и чувствительность измерительной системы?
12. Что такое разрешающая способность измерительного преобразования?
13. Что такое воспроизводимость измерительного преобразования?
14. Что такое точность и прецизионность измерительного преобразования?
15. Что называется шумами при измерении?
16. Что такое статическая характеристика датчика?
17. Что такое динамическая характеристика датчика?
18. Что такое тарировочная кривая датчика?
19. Что такое зона нечувствительности и порог чувствительности датчика?
20. Чем характеризуется линейная характеристика датчика?
21. Чем характеризуется нелинейная характеристика датчика?
22. Чем характеризуется релейная характеристика датчика?
23. Что такое петля гистерезиса при измерениях?
24. Что такое временная характеристика датчика?
25. Как отражается на статических характеристиках датчика учет знака измеряемой величины?
26. Что является показателями качества при переходном процессе измерения?
27. Что такое ступенчатое воздействие?
28. Что такое ударное (мгновенное) воздействие?
29. Что такое линейное воздействие?
30. Что такое гармоническое воздействие?
31. Что такое установившийся режим?
32. Что такое частотные методы?
33. Что называется комплексным передаточным коэффициентом?
34. Что такое годограф комплексного передаточного коэффициента?
35. Что такое амплитудно-фазовая характеристика?
36. Что такое амплитудно-частотная характеристика?
37. Что такое фазочастотная характеристика?
38. Что такое диапазон измерений датчика?
39. Что такое полоса пропускания датчика?
40. Как определяется чувствительность датчиков с различными статическими характеристиками?
41. Что такое погрешность датчика?
42. Какие погрешности датчиков называются систематическими?
43. Какие погрешности датчиков называются прогрессирующими?
44. Какие погрешности датчиков называются случайными?
45. Какие погрешности датчиков называются погрешностями применения?
46. Для чего нужно при проведении научных экспериментов неоднократно измерять одну ту же величину?
47. Для чего при измерении силовых факторов применяются упругие элементы?
48. Какие усилия при их измерении считаются большими, а какие малыми?
49. Какие конструктивные особенности упругих элементов дают возможность измерять крутящие моменты?
50. Какие конструктивные особенности упругих элементов дают возможность измерять параметры давлений жидкостей и газов?

Глава 2

РЕЗИСТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

§ 2.1. Электроконтактные датчики

Электроконтактные датчики строятся на основе электроконтактных преобразователей, которые преобразуют механическое перемещение в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью.

Схема одноконтактного резистивного преобразователя представлена на рис. 2.1. При изменении размера изделия 1 шток 3 переместится в направляющих 2 и укрепленный на нем контакт 4 войдет в соприкосновение с контактом 5, замкнув электрическую цепь.

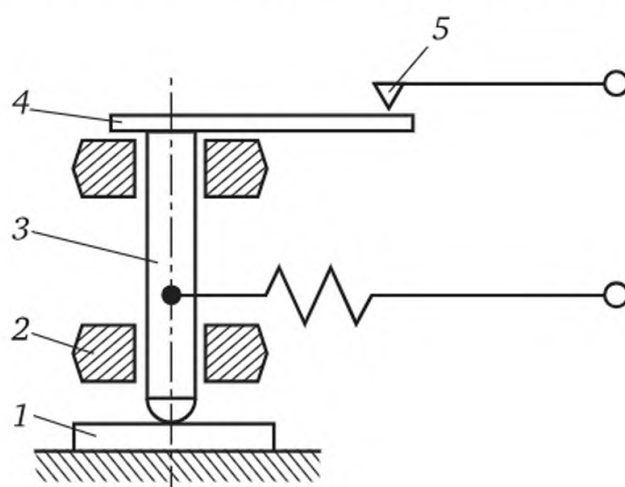


Рис. 2.1. Схема одноконтактного преобразователя перемещений

Существует большое количество конструкций электроконтактных преобразователей различного назначения. Так, достаточно широкое применение нашел так называемый двухконтактный преобразователь, схема которого аналогична уже рассмотренной.

В двухконтактном преобразователе шток с измерительным наконечником (обычно твердосплавным) прижимается создающей измерительное усилие пружиной к контролируемой поверхности измеряемой детали (в приборах окончательного контроля). Если осуществляется активный контроль в процессе обработки, то шток преобразователя может прижиматься к промежуточной детали (измерительному штоку).

Перемещающийся шток преобразователя обычно кинематически связан с поворачивающейся деталью — коромыслом, на концах которого устанавливаются два контакта, предназначенные для замыкания и размыкания соответствующих электрических цепей. Положение этих контактов может регулироваться при настройке преобразователя (обычно с помощью резьбовых настроечных головок).

Разновидностью двухконтактного преобразователя является преобразователь, конструктивно выполненный так, что перемещение измерительного штока кинематически связано с круговым шкальным индикатором часового типа. При использовании такого преобразователя оператор получает возможность контролировать нужный размер, следя за положением стрелки индикатора.

Принцип действия этих преобразователей одинаковый. В начале обработки детали, когда ее размер наибольший, измерительный шток контрольного устройства находится в крайнем (верхнем) положении. Первая пара из заранее настроенных контактов замкнута. По мере уменьшения контролируемого размера обрабатываемой детали измерительный шток преобразователя перемещается и коромысло начинает поворачиваться. Первая пара контактов размыкается, вследствие чего формируется и подается команда на изменение режима работы, например на переход от черновой к чистовой обработке. При дальнейшем снятии припуска (уже при чистовой обработке) измерительный шток продолжает перемещаться, а коромысло поворачиваться, пока вторая пара заранее настроенных контактов не замкнется. Это значит, что заданный размер достигнут, и обработка останавливается.

Для контроля и многодиапазонной сортировки деталей на размерные группы необходимо использовать многоконтактные преобразователи. Принципиальная схема такого преобразователя представлена на рис. 2.2. Соответствующими цифрами здесь обозначены те же элементы схемы, что и на рис. 2.1, с той лишь разницей, что вместо одной пары контактов 5 устанавливается группа из нескольких контактов, закрепленных на плоских пружинах. По мере перемещения измерительного штока 3 последовательно замыкается несколько пар контактов в контактной группе 5, чем обеспечивается подача различных сигналов по мере достижения деталью 1 различных размеров.

При проектировании контактных датчиков проблема заключается в уменьшении тока, протекающего через контакты, и в уменьшении величины перемещения измерительного штока, приводящего к срабатыванию контактов.

Эти проблемы решаются в так называемых электронных контактных реле. Принципиальная схема электронного контактного реле приведена на рис. 2.3.

На этой схеме: 1 и 2 — активные сопротивления, образующие входной делитель напряжения; 3 — обмотка электромагнитного контактного реле; 4 — транзистор; б, э и к — его база, эмиттер и коллектор соответственно. К эмиттеру транзистора 4 через обмотку электро-

магнитного контактного реле 3 подключено постоянное напряжение $+E_K$, а к его коллектору подключено постоянное напряжение $-E_K$. При отсутствии или малом значении напряжения U_{BX} на базе транзистора 4 ток базы определяется напряжением смещения, создаваемым входным делителем из сопротивлений 1 и 2. Коллекторный ток транзистора 4 в β раз больше, чем ток его базы (β — коэффициент усиления транзистора 4), но при этом не превышает тока срабатывания реле 3. При небольшом изменении входного напряжения U_{BX} ток базы увеличится, а ток коллектора увеличится еще значительно, и реле 3 сработает.

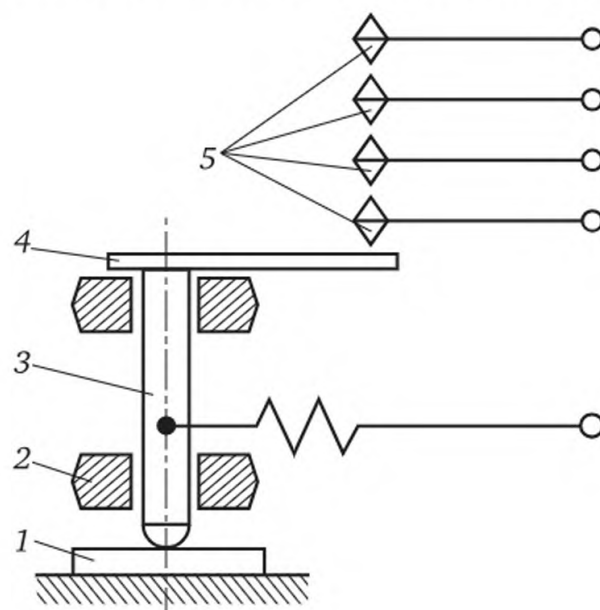


Рис. 2.2. Схема многоконтактного преобразователя перемещений

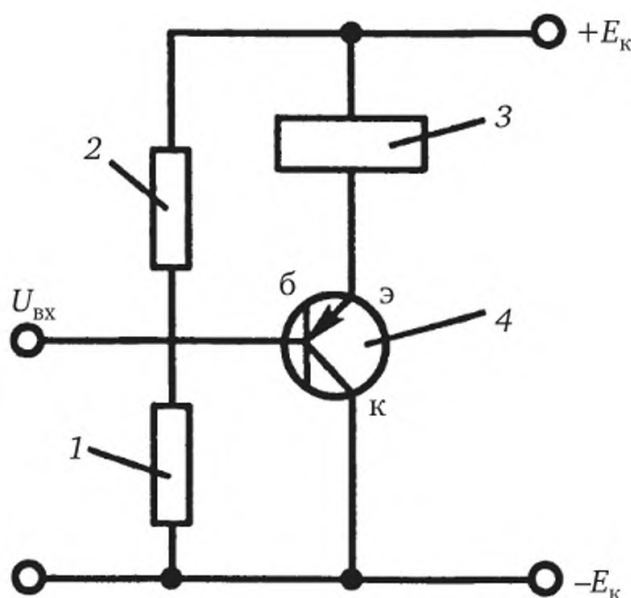


Рис. 2.3. Схема электронного контактного реле

Изменять напряжение на базе транзистора и тем самым включать и выключать электромагнитное реле можно не только подачей напря-

жения на базу транзистора, но и изменением соотношения величин сопротивлений во входном делителе. Если сопротивление 2 в рассмотренной схеме заменить фоторезистором, то получится фотореле. Его схема приведена на рис. 2.4. При подаче света на фоторезистор 2 реле 3 срабатывает.

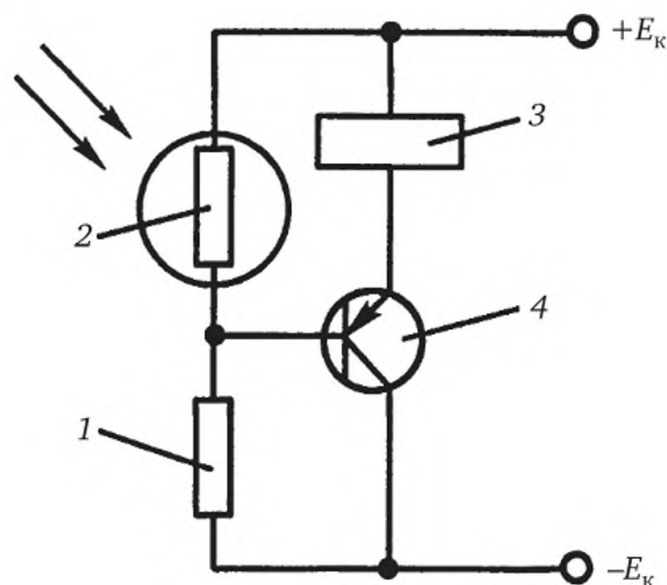


Рис. 2.4. Принципиальная схема фотореле

§ 2.2. Пневмоэлектроконтактные датчики

Для бесконтактного точного измерения размеров, особенно в массовом производстве, характерном для автомобильной и ряда других отраслей механообработки, часто применяются пневмоэлектроконтактные датчики. Принцип действия такого датчика основан на измерении сопротивления истечению воздуха через калиброванное сопло, находящееся на том или ином расстоянии от поверхности. Это расстояние и является контролируемой величиной, а само пневматическое сопротивление, образованное сочетанием калиброванного сопла с какой-либо поверхностью, в пневмоавтоматике принято называть элементом «сопло-заслонка». Незначительное изменение расстояния между калиброванным соплом и этой поверхностью приводит (таково свойство элемента «сопло-заслонка») к существенному изменению пневматического сопротивления элемента «сопло-заслонка» и, следовательно, к повышению давления воздуха перед ним. Повышение давления воздуха следует преобразовать в перемещение измерительного элемента, причем значительно большее, чем исходное изменение расстояния между калиброванным соплом и поверхностью контролируемой детали. Это будет означать «усиление» исходного механического перемещения без люфта и без использования подвижных частей. Преобразование изменения давления воздуха в перемещение жесткой

поверхности (жесткого торца) осуществляется с помощью *сильфона*. Сильфон — это замкнутый цилиндр с тонкими гофрированными стенками, обычно изготавливаемый из латунной фольги. При подаче в него давления воздуха сильфон расширяется и его торцы перемещаются друг относительно друга. Один из этих торцов может быть закреплен, а на втором устанавливается электрический контакт.

Конструктивная схема дифференциального сильфонного пневмоэлектроконтактного прибора приведена на рис. 2.5. Контроль диаметра отверстия в обрабатываемой детали 12 осуществляется с помощью пневматического калибра-пробки 13. Сжатый воздух подается от компрессора или от компрессорной сети через фильтр 9 и стабилизатор давления 10 в полости двух сильфонов: левого 2 и правого 6, образующих два колена датчика. Давление стабилизированного и очищенного питающего воздуха индицируется с помощью стрелочного прибора (манометра) 11. Одновременно очищенный и стабилизированный сжатый воздух поступает к калибру-пробке 13 и к регулируемому дросселю 8. Расход воздуха через дроссель 8 при его определенной настройке будет постоянным. Поэтому неизменным будет и давление в левом сильфоне 2. Расход воздуха через сопла 14 калибра-пробки и соответственно давление в правом сильфоне 6 будут зависеть от фактической величины зазора между внутренней поверхностью контролируемого отверстия и калибром-пробкой, т. е. от фактического размера контролируемого отверстия.

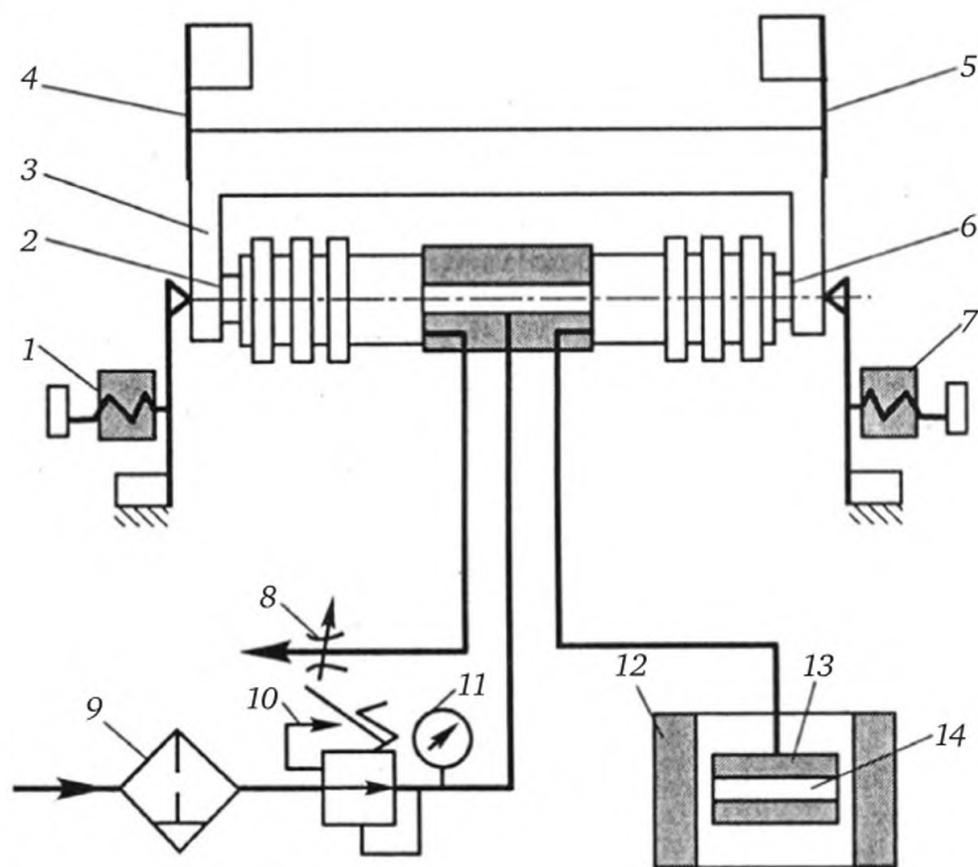


Рис. 2.5. Схема пневмоэлектроконтактного датчика

Если размер отверстия находится в пределах допуска, то давление воздуха в правом и левом коленах датчика примерно одинаково и датчик не подает никаких команд.

Если диаметр отверстия меньше заданного, то зазор между калибром-пробкой и отверстием сопла будет маленьким и давление в правом колене датчика возрастет. Тогда правый сильфон растянется, а левый сожмется. Рамка 3, подвешенная на плоских пружинах 4 и 5, сместится вправо, что вызовет замыкание регулируемого контакта 7. От датчика тогда последует дискретный сигнал «Размер занижен».

Если же отверстие получилось больше заданного, давление в правом колене датчика станет меньше, чем в левом, левый сильфон растянется, а правый сильфон сожмется. Рамка 3, подвешенная на плоских пружинах 4 и 5, сместится влево, что вызовет замыкание регулируемого контакта 1. От датчика тогда последует дискретный сигнал «Размер завышен».

Заметим, что к питающему воздуху предъявляются довольно высокие требования. Он должен быть свободен от механических примесей, а также водяного и масляного конденсата. Давление питающего воздуха должно быть стабилизировано в определенных пределах. Поэтому для питания измерительных пневмоэлектроконтактных датчиков не используется воздух от силовой компрессорной сети, а создается специальный источник измерительного воздуха.

В датчике применена дифференциальная схема измерений, что понижает требования к стабилизации питающего измерительного воздуха.

Для того чтобы можно было визуально следить за измеряемым размером, рамка 3 кинематически (обычно через зубчатый сектор) связывается со стрелочным индикатором.

§ 2.3. Реостатные датчики и контактные датчики сопротивления

Реостатными (потенциометрическими) датчиками называются датчики, которые строятся на основе преобразователей, представляющих собой реостат, движок которого движется под действием измеряемой неэлектрической величины. Входной величиной является при этом механическое перемещение движка, а выходной величиной — изменение сопротивления. Реостатный датчик является, таким образом, одной из разновидностей параметрических датчиков.

В реостатных датчиках на каркас, выполненный из изоляционного материала, наматывается с равномерным шагом обладающая определенным сопротивлением проволока. Изоляция проволоки с одной стороны каркаса зачищается, и по зачищенному участку скользит токосъемная щетка. Вторая щетка скользит по токосъемному кольцу. Обе щетки изолируются от оси, на которой они установлены. Обычно в реостатных преобразователях используется проволока на основе спла-

вов платины, обладающих высокими антикоррозионными свойствами и износостойкостью. Используются также такие сплавы, как фехраль, манганин и константан. Минимальные габаритные размеры реостатных датчиков лежат в пределах 5 мм.

Форма и размеры каркасов, на которые наматывается образующая электрическое сопротивление проволока, могут быть весьма разнообразными, например в виде кольца, цилиндра, пластины постоянного или переменного сечения. Выбирая форму каркаса, можно получить требуемую зависимость между механическим перемещением движка и выходным сопротивлением. На рис. 2.6 показан реостатный преобразователь, каркас которого имеет переменную высоту.

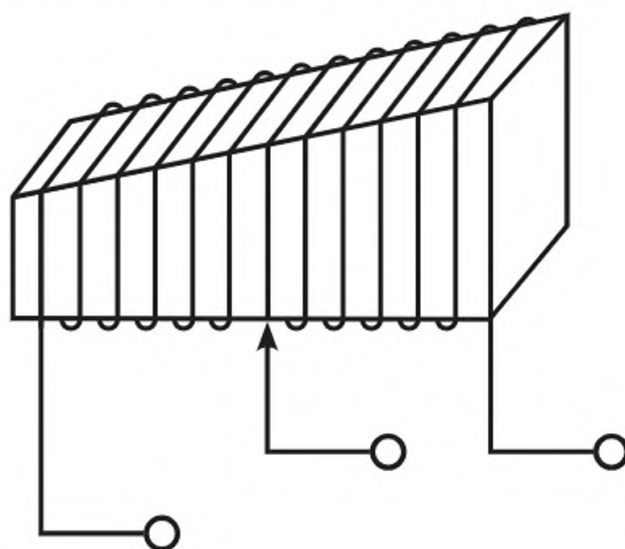


Рис. 2.6. Схема реостатного преобразователя с каркасом переменной высоты

Заметим, что в реостатных преобразователях непрерывному изменению входной величины (положению щетки) соответствует ступенчатое изменение выходной величины (выходного сопротивления), поскольку при перемещении щетки на следующий виток проволоки сопротивление меняется скачкообразно в зависимости от сопротивления одного этого витка. Однако при частой и густой намотке сопротивление одного витка оказывается небольшим, так что «высота» ступеньки на выходе также оказывается небольшой. На практике обычно с удовлетворительной точностью изменение выходной величины можно считать непрерывным.

В реостатных преобразователях предпочтительней переменный питающий ток вследствие того, что он проще поддается последующему усилению. Однако следует иметь в виду, что при высоких частотах питающего тока, как и при высокой частоте изменения входной величины, в измерительных цепях могут появиться паразитные емкости и индуктивности.

Несмотря на простоту и относительно большую распространенность реостатных датчиков, они обладают определенными недостатками.

Главными из них следует считать ограниченный срок службы (не превышающий одного миллиона циклов) и шумовой фон, возникающий вследствие механического перемещения контактных щеток.

На рис. 2.7, а приведено схемное изображение реостатного датчика с каркасом постоянной высоты, а на рис. 2.7, б показана зависимость его выходного напряжения от входного перемещения щетки-движка.

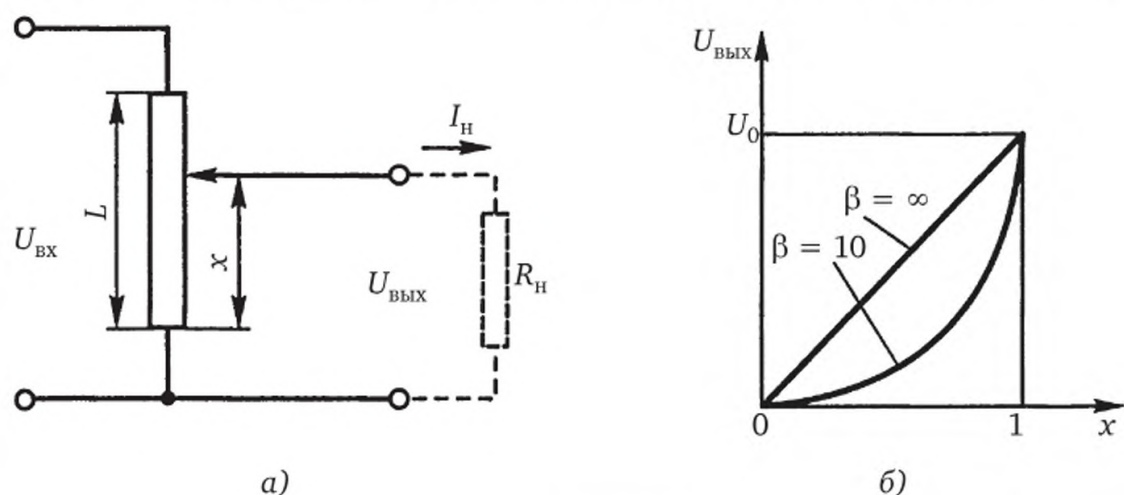


Рис. 2.7. Принципиальная схема и характеристика преобразователя реостатного датчика

На этом рисунке: $U_{\text{ВХ}}$ — питающее напряжение реостатного датчика; L — его длина; x — измеряемое перемещение; $U_{\text{ВЫХ}}$ — напряжение на выходе датчика; R_{H} — подключаемая нагрузка.

Введем величину $\beta = R_{\text{H}}/R_{\text{п}}$ — коэффициент нагрузки, где $R_{\text{п}}$ — полное сопротивление датчика. Естественно, что при бесконечно большой нагрузке (т. е. при полном разрыве выходной цепи) напряжение на выходе оказывается прямо пропорциональным входному перемещению (если пренебречь его ступенчатым характером), как показано на рис. 2.7, б. При любой конечной нагрузке, подключенной к реостатному датчику, его характеристика преобразования теряет свой линейный характер, что также видно из рис. 2.7, б.

Можно также построить *реверсивный* реостатный датчик, у которого изменение направления входного перемещения приводит к изменению знака напряжения на выходе датчика. Такие реостатные датчики строятся на основе потенциометров со средней точкой.

Схема такого датчика приведена на рис. 2.8, а, а зависимость между перемещением щетки-движка на входе датчика и напряжением на его выходе (если пренебречь ступенчатым характером этого перемещения) показана на рис. 2.8, б.

Реостатные преобразователи используются также для измерения силовых факторов, в частности давления. Пример такого датчика приведен на рис. 2.9.

В преобразователе, изображенном на этом рисунке, в корпусе 1 установлена эластичная диафрагма 2, которая под действием измеряемого

давления (силы) перемещает скользящий контакт (бегунок) 3 вдоль реостата 4. Изменение сопротивления при этом пропорционально смещению бегунка. Измерение сопротивления может производиться между клеммами А и В или А и С.

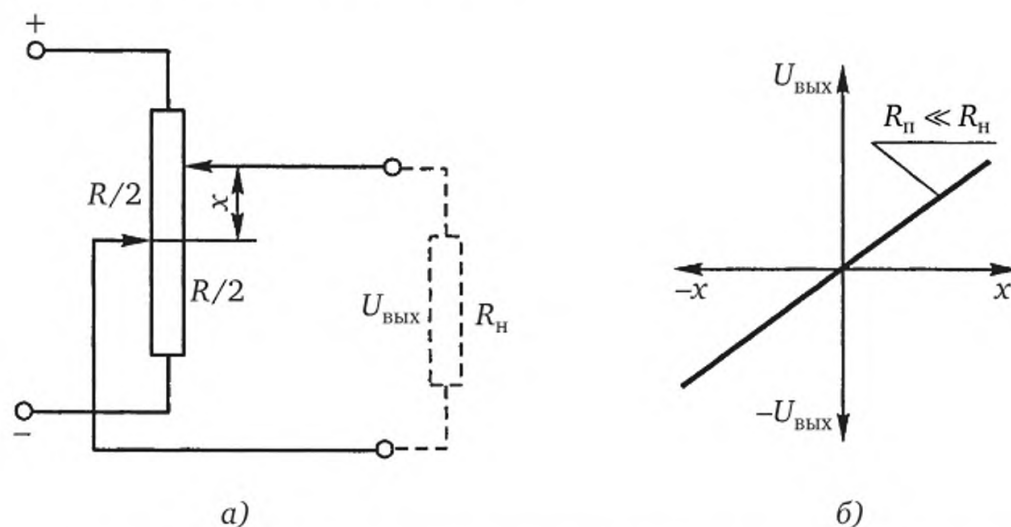


Рис. 2.8. Принципиальная схема реверсивного реостатного датчика и график зависимости между напряжением на его выходе и выходным перемещением

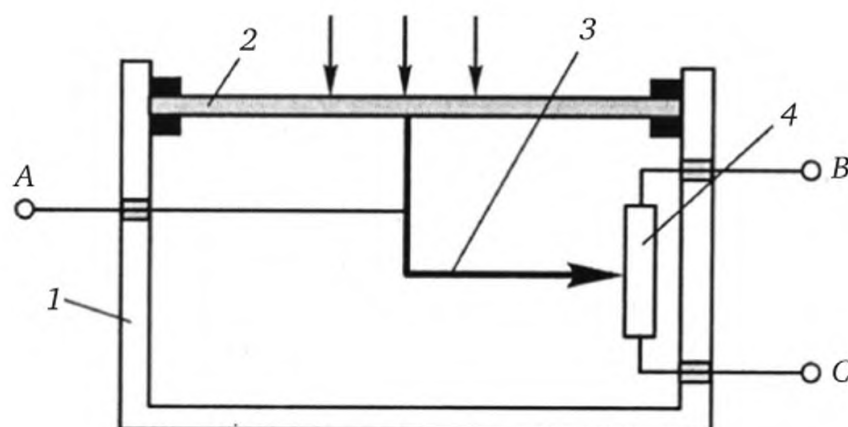


Рис. 2.9. Схема варианта реостатного преобразователя для измерения силовых факторов

Датчиками, омическое сопротивление которых изменяется под действием силовых факторов, являются также *контактные датчики сопротивления*. Принцип действия используемых для построения таких датчиков преобразователей основан на изменении под действием механического давления электрического сопротивления между проводящими элементами, разделенными слоями из плохо проводящего материала. В качестве такого материала могут использоваться слои электропроводящей бумаги, электропроводящей резины или металлические пластины, на которые путем напыления нанесен высокоомный резистивный слой.

Такие преобразователи используются в тактильных датчиках роботов и манипуляторов. Здесь давление порядка 100 кПа вызывает изменение сопротивления преобразователя от 100 Ом до 2 кОм.

Другим примером электроконтактного датчика сопротивления является обычный угольный микрофон, преобразующий колебания акустического давления в колебания электрического сопротивления, которые далее преобразуются в колебания электрического сигнала.

Для повышения чувствительности и исключения температурных погрешностей в схемах промышленной автоматики часто используют так называемый дифференциальный угольный датчик. Схема такого датчика показана на рис. 2.10.

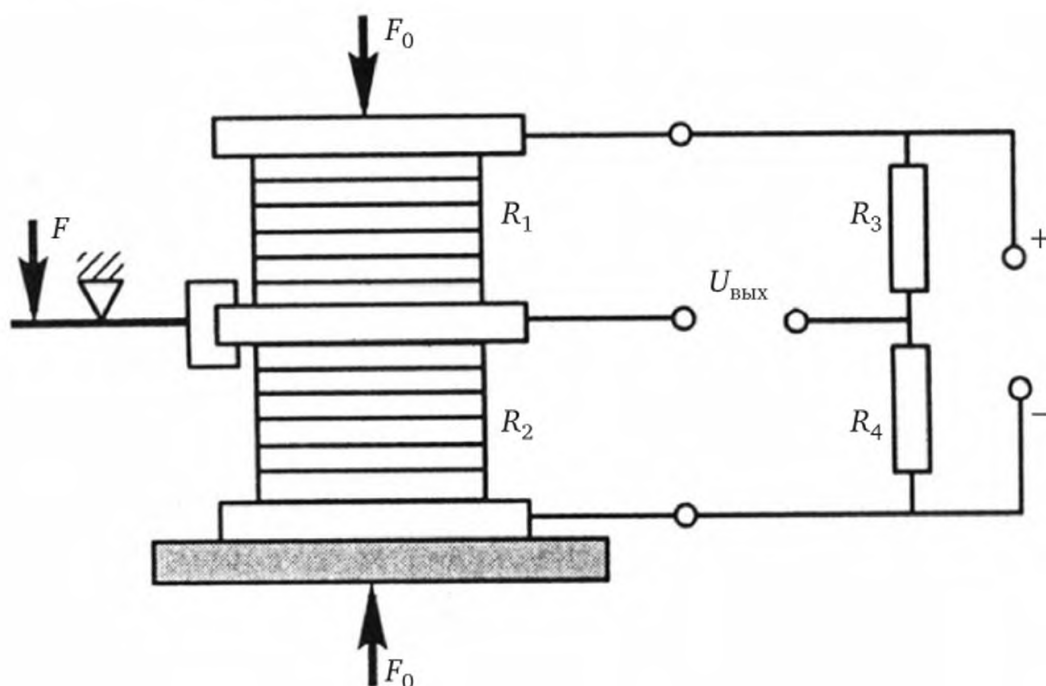


Рис. 2.10. Схема дифференциального угольного датчика

Согласно этой схеме между двумя проводящими, обычно металлическими, пластинами, которые служат для подсоединения к ним проводников, набирается столб из угольных пластин. Посередине этого столба между двумя соседними угольными пластинами устанавливается еще одна металлическая пластина. С одной стороны этой пластины отводится проводник, а другая ее сторона соединена с рычажной системой, к которой прилагается измеряемое усилие. Когда это усилие $F = 0$, сопротивления угольных пластин верхней и нижней половин угольного столба равны между собой: $R_1 = R_2$. К измерительной схеме подключаются также эталонные сопротивления R_3 и R_4 , обычно равные между собой. Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 образуют измерительный мост, к одной из диагоналей которого подключается напряжение питания. При отсутствии измеряемого усилия F измерительный мост сбалансирован и $U_{\text{вых}} = 0$. Если $F \neq 0$, то R_1 увеличивается, а R_2 уменьшается, и измерительный мост оказывается несбалансированным, тогда $U_{\text{вых}} \neq 0$.

§ 2.4. Тензодатчики (тензорезисторы)

В основе работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении сопротивления проводников и полупроводников при их механической деформации. Тензорезисторы бывают разных размеров, и их минимальная длина равняется примерно 0,025 см. Тензорезисторы закрепляются на поверхности исследуемого образца или монтируются в материал, деформация которого измеряется. Они способны измерять деформации порядка 1 мкм.

Тензорезисторы могут быть трех различных типов: *проволочные, фольговые и полупроводниковые*. Проволочные тензодатчики могут быть *наклеиваемыми и ненаклеиваемыми*, а полупроводниковые — *наклеиваемыми или диффузионными*. Соответствующая классификационная схема приведена на рис. 2.11.



Рис. 2.11. Классификация тензодатчиков

Для *наклеиваемых проволочных* тензорезисторов характерна следующая конструкция. На держатель — полосу тонкой бумаги или лаковую пленку — наклеивается решетка из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки диаметром 0,02...0,05 мм. К концам проволоки пайкой или сваркой присоединяются выводные медные проводники. Сверху тензорезистор покрывается слоем лака. Такой тензорезистор, будучи наклеенным на испытываемую деталь, воспринимает деформации ее поверхностного слоя. Измерительной базой в этом случае является длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5...20 мм, обладающие исходным сопротивлением 30...500 Ом. Держатель обеспечивает жесткость и постоянство размеров тензорезистора. Он также обеспечивает механический контакт с поверхностью, на которую он наклеивается. Иногда используются и временные держатели, которые удаляются непосредственно перед использованием такого преобразователя, чем обеспечивается лучший механический и тепловой контакт между датчиком и деталью, к которой он прикрепляется.

Хотя тензопреобразователи реагируют главным образом на деформацию, происходящую вдоль их длины, они также имеют и некоторую поперечную чувствительность. Длинный узкий датчик измеряет деформацию в основном только в одном направлении, а петлеобразная конструкция позволяет увеличить его длину при относительно малых габаритах. Однако концы петель оказываются все же чувствительными к поперечной деформации, воздействие которой необходимо уменьшать. Деформация может быть измерена в нескольких направлениях с помощью конструкции, выполненной в виде розетки. При этом она может быть *многослойной* (т. е. состоять из отдельных элементов, наложенных друг на друга) или же *планарной* — в этом случае элементы тензодатчика не перекрываются. Для уменьшения токов утечки при высокой температуре или при высоком потенциале следует добиваться уменьшения площади поверхности наклеиваемых проволочных тензодатчиков.

Ненаклеиваемый проволочный тензодатчик обычно состоит из четырех проволочных секций, намотанных на рамки. Рамки ориентируются таким образом, что усилия, нормальные к их плоскостям, будут вызывать увеличение напряжения в двух секциях, в то же время уменьшая его в двух оставшихся секциях. Проволочные секции электрически соединяют между собой таким образом, чтобы они образовывали четыре плеча измерительного моста. Это повышает чувствительность измерения и в определенной степени обеспечивает температурную компенсацию. Ненаклеиваемые тензодатчики обладают меньшей чувствительностью, чем наклеиваемые, и имеют большие габариты. Они обычно используются в приборах, в которых они представляют собой конструктивную часть какого-либо другого устройства, например нагрузочного элемента или же акселерометра.

Фольговые тензорезисторы можно получить травлением из фольги толщиной 4...12 мкм, так чтобы оставшаяся после травления часть металла образовывала решетку с выводами. Таким образом, удастся получить тензопреобразователи с меньшими габаритами, чем проволочные. Известны фольговые тензорезисторы с базой 0,8 мм.

Фольговые тензорезисторы можно также получить методом вакуумной возгонки тензочувствительного материала с последующим его осаждением на основу (подложку). В этом случае форма тензорезистора определяется маской, через которую производится напыление. Пленочные тензорезисторы имеют толщину менее 1 мкм.

На рис. 2.12 представлены примеры конструктивных схем проволочного и фольгового тензодатчиков.

Полупроводниковые тензодатчики изготавливают из кремниевых кристаллов, нарезанных в виде волокон.

Наклеиваемый полупроводниковый датчик по конструкции подобен наклеиваемому металлическому тензодатчику и дает на выходе напряжение порядка 15 мВ на 1 В возбуждения.

Диффузионный полупроводниковый датчик изготавливается путем диффузии материала датчика в поверхность диафрагмы, которая пред-

ставляет собой тонкий срез монокристалла кремния. Он имеет более высокую линейность (0,05 %) и меньший гистерезис (0,01 %), чем полупроводниковые датчики наклеиваемого типа, но уровень выходного сигнала у него ниже (10 мВ/В).

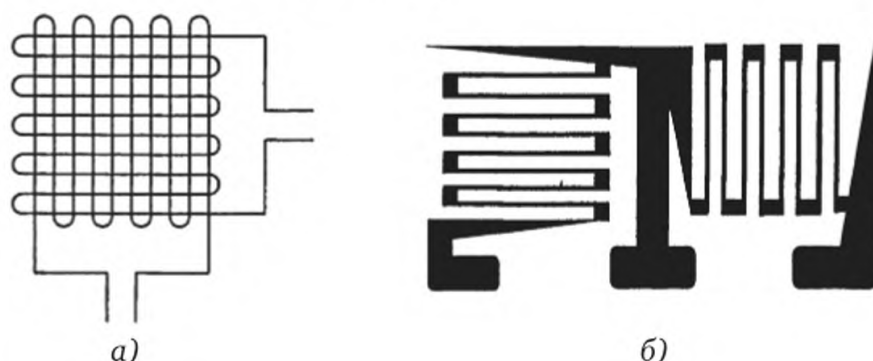


Рис. 2.12. Конструктивные схемы проволочного (а) и фольгового (б) тензодатчиков

Схема наклеиваемого кремниевого тензопреобразователя приведена на рис. 2.13. На этом рисунке: 1 — монокристалл кремния; 2 — активная длина датчика; 3 — контакт.

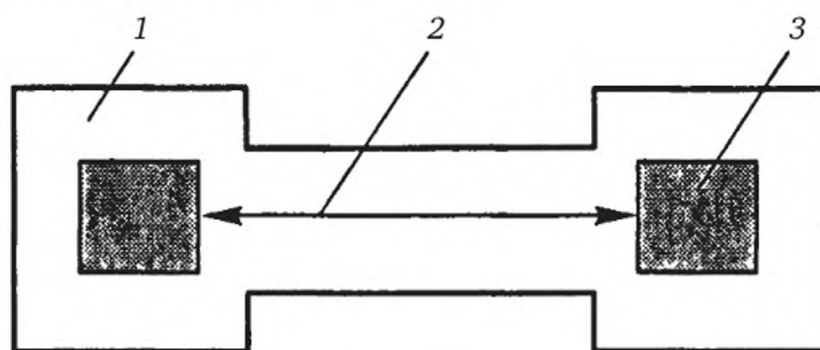


Рис. 2.13. Схема наклеиваемого кремниевого тензопреобразователя

В целом полупроводниковые тензодатчики значительно чувствительнее металлических, но характеризуются меньшей линейностью и обладают более высокой температурной чувствительностью.

Для изготовления тензопреобразователей используются металлы, обладающие высокой температурной стабильностью, т. е. низким температурным коэффициентом сопротивления. Это особенно важно при измерении статических напряжений. Перечислим наиболее широко применяющиеся сплавы.

- Медно-никелевые сплавы, например константан. Этот сплав имеет низкий температурный коэффициент сопротивления и используется для измерения статических напряжений, когда уровень деформаций ниже 15 мкм/см и температурный диапазон составляет от -70 до $+230$ °С.

- Никель-хромовые сплавы, например стабиллой. Этот сплав имеет хорошую стабильность при температуре до 350 °С и обладает большим сроком службы.

- *Никель-железные сплавы*, например *диналой*. Этот сплав имеет высокий коэффициент тензочувствительности, хотя и характеризуется сравнительно низкой температурной стабильностью. Он применяется обычно для измерения динамических напряжений.

- *Платиново-вольфрамовые сплавы*. Они имеют высокую стабильность и длительный срок службы и используются для статических измерений при температуре до 650 °С и для динамических измерений при температуре до 820 °С.

В качестве временных покрытий обычно используется слоистый винил.

Назовем материалы, используемые для постоянных покрытий.

- *Полиамидные смолы*. Эти материалы используются в качестве пленочных покрытий, наносимых методом полива на рабочий слой. Они образуют тонкий прочный слой покрытия, который выдерживает относительное растяжение до 20 % и пригоден для использования при температуре до 200 °С. Эти смолы могут также армироваться слоистым стеклянным носителем. Такие покрытия выдерживают температуру до 400 °С.

- *Бумага, пропитанная феноловыми смолами*. Такое покрытие используется при температуре до 260 °С. Оно наклеивается на фольгу или на проволоку при нагреве под давлением. Иногда осуществляется стекловолоконная армировка такого покрытия, что стабилизирует его форму, хотя и уменьшает диапазон деформаций.

- *Металлическая прокладка* толщиной до 0,005 см, к которой тензопреобразователи крепятся изолирующим связующим веществом. Эта прокладка может прикрепляться к испытуемой детали с помощью точечной сварки. Значения температурных коэффициентов расширения детали и прокладки должны быть одинаковы.

Связующие вещества, используемые для крепления тензодатчика к детали, должны обладать высоким сопротивлением деформации сдвига во всем диапазоне измерений, что обеспечивает точную передачу деформации от детали к чувствительному элементу тензодатчика. Кроме того, они должны обладать высоким изолирующим сопротивлением порядка 10 000 МОм. Наиболее широкое применение получили нижеследующие виды связующих веществ.

- *Нитроцеллюлозный клей*. Он застывает при комнатной температуре в течение 2...48 ч и может работать в температурном диапазоне от -70 до +80 °С. Этот клей совместим с большинством материалов, за исключением тех, которые подвергались воздействию кетонных растворителей. При необходимости тензодатчик можно отсоединить от поверхности детали, используя именно кетон. Однако нитроцеллюлоза гигроскопична, поэтому для обеспечения долговременной стабильности измерительное устройство должно иметь влагоустойчивое покрытие.

- *Цианакриловые клеи*. Эти клеи совместимы с большинством материалов и держателей, образуют хороший контакт при соприкосновении

и быстро застывают, поэтому с их помощью тензодатчик может быть установлен на детали за несколько минут. Они работают в достаточно широком температурном диапазоне от -70 до $+620$ °С, чувствительны к влажности и поэтому требуют защиты.

- *Эпоксидные смолы.* Некоторые из них затвердевают при комнатной температуре в течение 2...10 ч, а другие требуют для затвердевания выдержки при температуре от 100 до 200 °С в течение 1...5 ч. Они имеют рабочий диапазон температур от -250 до $+300$ °С и не реагируют на многие химикаты и на влажность.

- *Керамический цемент.* Он используется как связующее вещество для датчиков, имеющих временный держатель и работающих при температурах выше 400 °С. Цемент, который является изолятором, наносится на тензодатчик и на испытываемую деталь, а затем спекается при 320 °С. В результате образуется твердое пористое покрытие, которое может работать в температурном диапазоне от -450 до $+600$ °С.

Для измерения различных физических величин (сил, давлений, деформаций, крутящих моментов и др.) тензорезисторы включают в измерительные схемы мостового или потенциометрического типа. В состав этой измерительной схемы должны входить и различного рода вспомогательные элементы (например, источники питания, балансирующие и стабилизирующие устройства, делители напряжения и т. д.).

Выходной сигнал измерительного моста с проволочными тензодатчиками составляет обычно не более 10...50 мВ при деформации 1 %. Выходной сигнал измерительного моста с полупроводниковыми тензодатчиками имеет обычно такое же значение, но при деформации 0,1 %.

Включение во все четыре плеча измерительного моста активных тензорезисторов и их правильное расположение на поверхности испытуемой детали (в соответствии с измеряемыми напряжениями) позволяет до четырех раз повысить величину измеряемого сигнала.

Повысить напряжение питания и тем самым увеличить выходной сигнал можно при питании тензорезисторов импульсным током.

§ 2.5. Терморезисторы, термопары и магниторезистивные датчики

Терморезисторы — это разновидности параметрических резистивных датчиков, меняющие свое сопротивление в соответствии с изменением измеряемой температуры.

Терморезисторы бывают двух разновидностей: *полупроводниковые* и *металлические*. Для металлических терморезисторов используют такие металлы, как платина и медь, причем эти металлы должны быть особо чистыми. Применяют также никелевые сплавы, которые имеют температурный коэффициент, в два раза более высокий, чем у платины, что значительно повышает чувствительность преобразования. Качественная зависимость от температуры отношения сопротивления

терморезистора при температуре T к его сопротивлению R_0 при нулевой температуре представлена на рис. 2.14. На этом рисунке характеристика 1 соответствует металлическому терморезистору, а характеристика 2 — полупроводниковому.

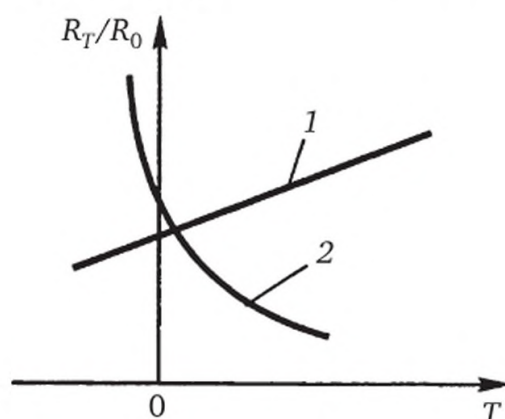


Рис. 2.14. Зависимость сопротивления терморезистора от измеряемой температуры

Существует два способа измерения температуры с помощью терморезисторов:

1. Температура определяется окружающей средой. В этом случае терморезистор называется *термометром сопротивления* и включается в схемы измерительных мостов.

2. Температура определяется условиями охлаждения терморезистора, нагреваемого постоянным по величине током. Такая схема применяется, например, для построения датчиков потока жидкости или газа, теплопроводности окружающей среды, плотности окружающего газа и т. п.

Полупроводниковые терморезисторы называют *термисторами*.

Термометры сопротивления имеют чувствительность $0,1 \dots 10 \text{ Ом}/^\circ\text{С}$, воспроизводимость $0,05 \text{ }^\circ\text{С}$, диапазон измеряемых температур $150 \dots 850 \text{ }^\circ\text{С}$, минимальные габариты $5 \times 5 \text{ мм}$.

Термисторы имеют чувствительность $0,1 \dots 1,0 \text{ Ом}/^\circ\text{С}$, воспроизводимость $5 \text{ }^\circ\text{С}$, диапазон измеряемых температур $-100 \dots +350 \text{ }^\circ\text{С}$, минимальный диаметр $0,8 \text{ мм}$.

Примером терморезистора, использующего второй из вышеназванных методов измерений, является датчик анемометра, служащего для измерения скорости газового потока. Схематическое изображение этого датчика приведено на рис. 2.15. В соответствии с методом измерений, изображенным на рис. 2.15, нить 1 нагревается протекающим по ней током до температуры $200 \dots 800 \text{ }^\circ\text{С}$.

Одновременно она охлаждается газовым потоком. Коэффициент теплоотдачи является функцией скорости газового потока, и при постоянном токе накала нити ее температура также является функцией скорости этого потока. В описываемом устройстве нить 1 выполнена из платины и имеет длину 10 мм . Концы проволоки припаяны к держа-

телям 2, закрепленным в корпусе 3. К этим держателям по проводникам 4 подводится электрическое питание.

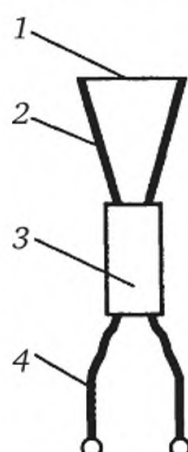


Рис. 2.15. Схема термометра сопротивления для измерения скорости газового потока

Интенсивность охлаждения газовым потоком нагретой металлической проволоки зависит не только от скорости этого потока, но и от его состава. Поэтому датчики такого рода находят применение, например, в системе контроля и регулирования содержания угарного газа СО в выхлопных газах автомобильного двигателя. Это содержание зависит от полноты сгорания топлива, а следовательно, и от оптимального для данных оборотов двигателя соотношения между расходом воздуха и бензина в рабочей смеси. Схема такой установки приведена на рис. 2.16.

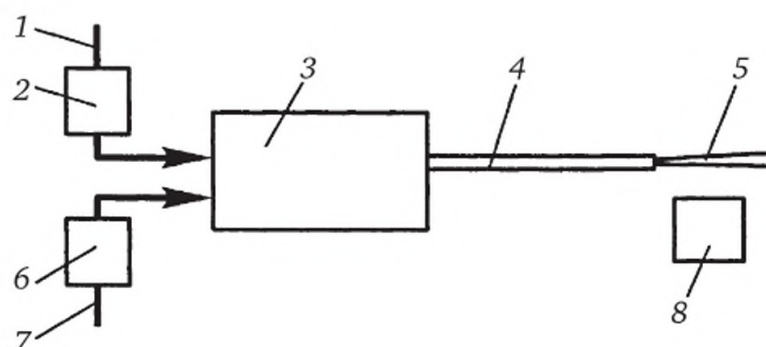


Рис. 2.16. Схема контроля качества рабочей смеси автомобильного двигателя

На этом рисунке датчик 8, установленный в выхлопной трубе 4 двигателя 3, контролирует содержание СО в потоке выхлопных газов 5. Одновременно датчик 2 измеряет расход воздуха 1, а датчик 6 измеряет расход паров бензина в их потоке 7. Путем сопоставления показаний датчиков 2, 6 и 8 производится контроль качества приготовления рабочей смеси и работы двигателя. Показания датчика 6 могут быть также использованы для индикации мгновенного значения удельного расхода бензина.

Особого рассмотрения требует метод измерения температур, основанный на использовании *термопар*. Термопара, использующая явление термоэлектричества, представляет собой источник *термо-ЭДС*, т. е. это не *параметрический*, а *генераторный* датчик. Термодатчики такого типа широко применяются в целях исследования и автоматизации технологических процессов и заслуживают самостоятельного рассмотрения.

Явление термоэлектричества, открытое Зеебеком, заключается в том, что в электрической цепи, составленной из двух различных проводников или полупроводников, соединенных своими концами, появится ЭДС и потечет ток, если сделать различную температуру точек соединения проводников. Это явление называется эффектом Зеебека. Цепь из подобных проводников, которые в этом случае называются *термоэлектродами*, называется термопарой, а места соединения проводников независимо от процесса, с помощью которого это соединение было осуществлено, называются *спаями*. Термоэлектрическую цепь можно разорвать в месте спая или разорвать любой из термоэлектродов и вставить дополнительный проводник в место разрыва. При этом значение термо-ЭДС останется прежним. Пельтье открыл, что термоэлектрический эффект обратим, т. е. если через цепь, состоящую из двух различных проводников или полупроводников, пропустить электрический ток, то один из спаев нагреется, а другой охладится. Какой из спаев нагреется, а какой охладится, зависит от направления тока. Это явление называется эффектом Пельтье.

Статические характеристики различных комбинаций термоэлектродов, образующих термопары, представлены на рис. 2.17. На этом графике 1 соответствует паре медь-константан, 2 — паре хромель-алюмель, 3 — паре железо-константан, 4 — паре хромель-константан, 5 — паре вольфрам-рений и 6 — паре платина-платинородий.

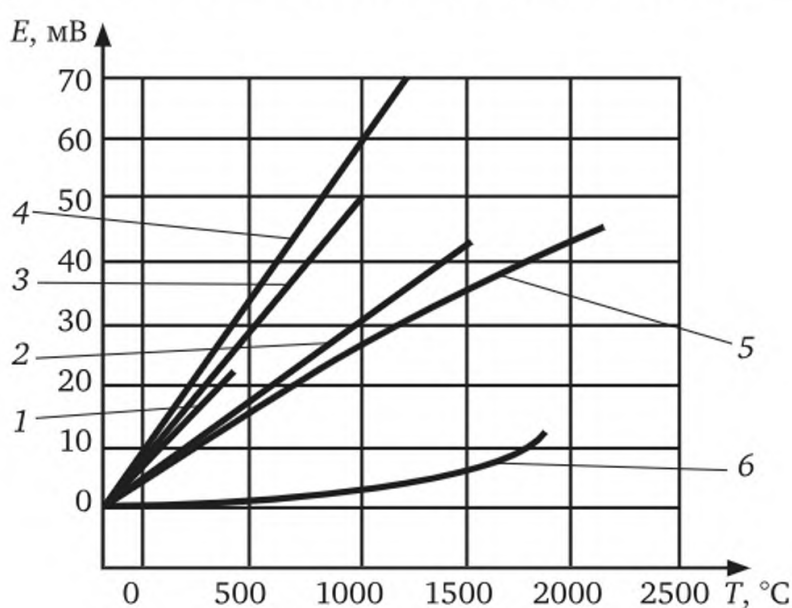


Рис. 2.17. Статические характеристики различных термопар

При конструировании термопар стремятся подбирать электроды, один из которых развивает с платиной положительную, а другой — отрицательную ЭДС. Характеристики термопар обусловлены стандартами. Из представленных на рис. 2.17 характеристик видно, в частности, что пара медь-константан предназначена для работы при температурах, не превышающих 350 °С.

Термопары вообще достаточно хрупки и подвержены коррозии. Поэтому их заключают в защитный корпус, внутри которого находится инертный газ, предохраняющий термопару от окисления. Наличие корпуса значительно увеличивает инертность термопары и уменьшает ее коэффициент полезного действия. Поэтому термопары не используются при измерении температур маломощных источников, а также тел, имеющих малую теплоемкость или малую теплопроводность. В промышленности термопары используют, например, при определении температуры в плавильных или закалочных печах.

Наконец, следует назвать еще один из видов резистивных параметрических датчиков, так называемый *магниторезистивный преобразователь*. Сущность его работы заключается в том, что под воздействием магнитного поля некоторые ферромагнитные материалы, например пермаллой (80 % Ni и 20 % Fe), существенно изменяют свое сопротивление. Величина изменения сопротивления зависит от напряженности магнитного поля и угла между вектором напряженности магнитного поля и направлением тока.

Обмотка такого датчика выполняется методом травления или напыления на изолирующей подложке в виде так называемого двойного меандра, как показано на рис. 2.18. Сопротивления A и B включаются в плечи измерительного моста, и при подаче напряженности внешнего магнитного поля H сопротивления A и B изменяются, так что мост оказывается разбалансированным. По напряжению, возникающему в диагонали измерительного моста, можно делать выводы о произошедшем изменении магнитного поля. Такой датчик может служить, например, для счета оборотов диска, в который заделан постоянный магнит. Во время каждого оборота диска при неподвижном жестко закрепленном датчике в рабочей зоне датчика возникает «всплеск» напряженности магнитного поля, что приводит к «всплеску» напряжения в диагонали измерительного моста. Таким образом можно построить датчик вращения циклического типа.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип работы электроконтактного преобразователя?
2. Для чего применяется одноконтактный преобразователь?
3. Для чего применяется многоконтактный преобразователь?
4. Для чего необходимо уменьшать ток через контакты электроконтактного преобразователя?
5. Для чего необходимо уменьшать перемещение измерительного штока электроконтактного преобразователя?

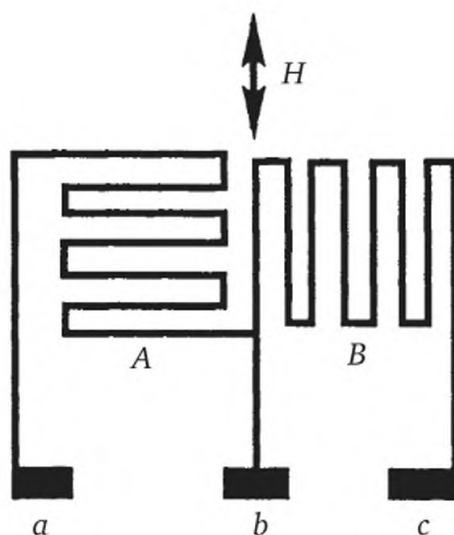


Рис. 2.18. Графическое изображение обмотки магниторезистивного датчика

6. Каков принцип работы электронного реле?
7. Как устроен и для чего служит входной делитель напряжения в электронном реле?
8. Как используется фоторезистор при построении фотореле?
9. Что такое пневматический элемент «сопло-заслонка»?
10. Как происходит безлюфтовое усиление перемещений в пневматическом датчике?
11. Что такое сильфон и каким образом он используется в технике измерений?
12. Как устроена и для чего применяется дифференциальная схема построения сильфонного датчика?
13. От каких компонентов очищается измерительный воздух?
14. Сколько пределов измерения в пневмоэлектроконтактном датчике?
15. Как происходит настройка на размер контролируемой детали при использовании пневмоэлектроконтактного датчика?
16. Каков принцип работы реостатного резистивного датчика?
17. Какие материалы используются для проволоки, наматываемой на каркас реостатного датчика?
18. Какую форму можно придавать каркасу для намотки реостатного датчика, как эта форма влияет на функцию преобразования?
19. Непрерывно или ступенчато изменяется выходная величина реостатного датчика?
20. Что такое реверсивный реостатный датчик?
21. Как отражается на статической характеристике реостатного датчика его подключение по схеме «средней точки»?
22. Каковы основные недостатки, присущие реостатным датчикам?
23. Что такое коэффициент нагрузки реостатного датчика?
24. Как устроен и работает прибор для контроля давления на основе реостатного датчика?
25. В чем состоит принцип работы датчика контактного сопротивления?
26. Как устроен угольный дифференциальный датчик сопротивления?
27. В чем заключается тензоэффект?
28. Что такое проволочные тензодатчики?
29. Что такое постоянный и удаляемый держатель?

30. Как устроены наклеиваемые и неклеиваемые проволочные тензодатчики?
31. Что такое фольговые тензодатчики?
32. Какие основные технологические методы используются для реализации фольговых тензодатчиков?
33. Что такое полупроводниковые тензодатчики?
34. Как работают диффузионные полупроводниковые тензодатчики?
35. Как устроен тензодатчик, изготавливаемый из монокристалла кремния?
36. Из каких материалов изготавливаются металлические чувствительные элементы тензодатчиков?
37. Из каких материалов изготавливаются держатели для тензодатчиков?
38. Какими материалами тензодатчики прикрепляются к контролируемой детали?
39. Каковы основные характеристики и области рационального применения проволочных тензодатчиков?
40. Каковы основные характеристики и области рационального применения фольговых тензодатчиков?
41. Каковы основные характеристики и области рационального применения полупроводниковых тензодатчиков?
42. Что называется терморезистором?
43. Чем отличаются между собой статические характеристики металлических и полупроводниковых терморезисторов?
44. Какие существуют методы измерений с помощью терморезисторов?
45. Что такое «термометр сопротивления»?
46. Каким образом термометр сопротивления используется для контроля скорости газового потока?
47. Каким образом термометр сопротивления используется для контроля состава газового потока?
48. Какой принцип положен в основу построения термопар?
49. Является ли эффект образования термо-ЭДС обратимым?
50. Какие материалы используются для построения термопар?
51. Каковы области преимущественного применения различных комбинаций материалов для термоэлектродов в термопарах?
52. Чем обусловлена необходимость помещения термопар в защитный корпус?
53. Какой принцип лежит в основе построения магниторезистивных датчиков?
54. Что такое обмотка магниторезистивного датчика, построенная по принципу «двойного меандра», и как она включается в измерительные схемы?
55. Как магниторезистивные датчики используются для бесконтактного счета оборотов?

Глава 3

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ, ОСНОВАННЫЕ НА ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА

§ 3.1. Физические явления при пьезоэффекте

Термин «*пьеzo*» переводится с греческого языка как «давить». *Пьезоэффект* был открыт в 1880 г. братьями Жаком и Пьером Кюри и связывает механическую деформацию в кристалле с возникающей в нем разностью потенциалов. Механическое воздействие, приложенное определенным образом к пьезоэлектрическому кристаллу, порождает в нем электрическое напряжение. Это явление называется *прямым* пьезоэффектом. И наоборот, электрическое напряжение, приложенное к пьезоэлектрическому кристаллу, вызывает его механическую деформацию, что представляет собой *обратный* пьезоэффект.

Пьезоэффект обладает *знакочувствительностью*, т. е. происходит изменение знака возникающего электрического заряда при замене сжатия растяжением и соответственно изменение знака деформации кристалла при изменении направления электрического поля. Пьезоэлектрический эффект может наблюдаться в кристаллах, которые не имеют центра симметрии. В природе существует 21 класс кристаллов, не обладающих такой симметрией, и свыше тысячи кристаллических материалов проявляют пьезокристаллический эффект.

Пьезоэлектричество наблюдается как в монокристаллических материалах, например в кварце, турмалине, ниобате лития, сегнетовой соли и др., так и в поликристаллических материалах, например в титанате бария, титанате свинца, цирконате свинца и др.

Физические явления, происходящие при пьезоэлектрическом эффекте, рассмотрим на примере широко известного пьезокристаллического материала — кварца, как показано на рис. 3.1.

Чтобы получить хорошие пьезоэлектрические свойства, кварцевые кристаллы следует точно ориентировать. Природные формы кристаллов также ограничиваются простейшими конфигурациями, например пластинками или дисками.

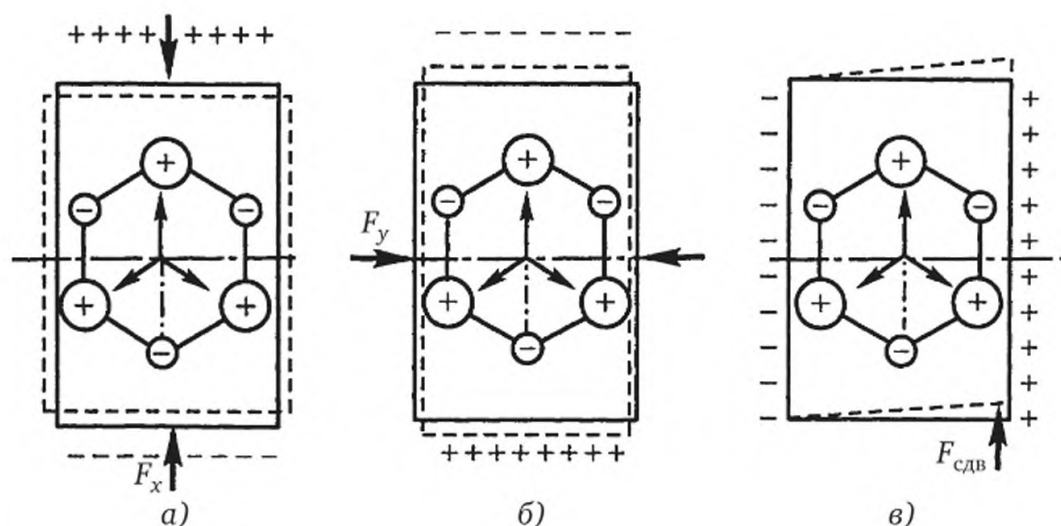


Рис. 3.1. Схемы продольного (а) и поперечного (б) сжатия и сдвига (в) в кристалле кварца

Ячейка кварца при отсутствии механического воздействия в целом электрически нейтральна, но в ней можно выделить три направления, проходящие через центр и соединяющие два разнополярных иона (диполя). Эти полярные направления называются *электрическими осями*, или осями X , и по ним направлены векторы поляризации P_1 , P_2 и P_3 . Если к кристаллу приложить механическую нагрузку, равномерно распределенную по его грани, то в результате деформации элементарной ячейки ее электрическая нейтральность нарушается. При этом, как показано на рис. 3.1, а и б, при деформированном состоянии ячейки сумма проекций двух векторов поляризации P_2 и P_3 на ось X становится меньше (при сжатии) или больше (при растяжении) третьего вектора P_1 . Появляется отличная от нуля равнодействующая векторов поляризации, которой соответствуют поляризационные заряды на гранях кристалла. Знаки этих зарядов для сжатия по осям X и Y показаны соответственно на рис. 3.1, а и б.

Деформация ячейки не влияет на электрическое состояние вдоль оси Y . Здесь сумма поляризационных векторов в силу симметрии равна нулю.

Образование поляризационных зарядов на гранях, перпендикулярных оси X , под воздействием силы, направленной по этой оси X , называется *продольным пьезоэффектом*.

При направлении механической нагрузки вдоль одной из осей Y , перпендикулярных оси X (они называются *механическими осями*), геометрическая сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось X оказывается не равной третьему вектору P_1 . Так, при сжатии пьезокристалла по оси Y , как показано на рис. 3.1, б, указанная сумма превышает вектор P_1 . В результате на нижней грани кристалла образуются положительные заряды, а на верхней грани — отрицательные. Эффект образования электрических зарядов на гранях, перпендикулярных механически нагружаемому, называется *поперечным пьезоэффектом*.

При равномерном нагружении кристалла со всех сторон (например, при гидростатическом сжатии) кристалл кварца остается электрически нейтральным. Кристалл кварца остается также электрически нейтральным при механическом нагружении, действующем вдоль оси Z , перпендикулярной осям X и Y . Эта ось называется *оптической осью* кристалла.

При механическом воздействии сдвига, как показано на рис. 3.1, в, геометрическая сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось X оказывается равной третьему вектору P_1 , направленному вдоль оси X , и на гранях, перпендикулярных оси X , поляризационных зарядов не возникает. Однако проекции векторов P_2 и P_3 на ось Y между собой не равны, и на гранях, перпендикулярных оси Y , возникает заряд.

Кроме естественных кристаллов, подобных кварцу или турмалину, для получения пьезоэффекта может быть использована также и пьезокерамика. Но в отличие от естественных кристаллов пьезокерамика вследствие хаотической ориентации электрических диполей сразу после ее изготовления не обладает пьезоэлектрическими свойствами. Для приобретения таких свойств ее подвергают «тренировке». Эта «тренировка» заключается в воздействии электрического поля напряженностью от 10 до 30 кВ/см при температуре несколько ниже точки Кюри. После этого такой материал будет вести себя как монокристалл. Преимущество пьезокерамики, заключающееся в том, что из нее оказывается возможным изготавливать детали сложной конфигурации, отличающиеся высокой химической стойкостью, при этом сохраняется. Пьезокерамические преобразователи изготавливаются по стандартным технологиям, принятым для керамических материалов.

Но керамический материал может и потерять свои пьезоэлектрические свойства, если он подвергается воздействию сильного переменного электрического поля, или воздействию постоянного поля, противоположного первоначальному направлению поляризации, или если температура возрастает выше точки Кюри, или если механическое воздействие превышает определенный уровень.

Как правило, пьезокерамика обладает значительно более высокими, чем кварц, пьезоэлектрическими показателями, но имеет худшие физико-механические характеристики. Модуль упругости пьезокерамических материалов лежит в пределах $E = (0,65 \dots 1,3) \cdot 10^{11}$ Па.

На рис. 3.2 показаны различные принципиальные схемы пьезоэлектрических преобразователей, использующихся в схемах измерений механических параметров.

На рис. 3.2, а изображен преобразователь, в котором используется *прямой* пьезоэлектрический эффект. Такие преобразователи применяются в приборах для измерения силы, давления и ускорения. На рис. 3.2, б изображен преобразователь, в котором используется *обратный* пьезоэлектрический эффект. Такие преобразователи применяются в качестве излучателей акустических, в том числе ультразвуковых, колебаний, в качестве преобразователей электрического напряжения в механическую деформацию, например в пьезоэлектрических

реле или в исполнительных элементах автоматических систем, перемещающих зеркала оптических приборов, в обратных преобразователях приборов балансировки и т. д.

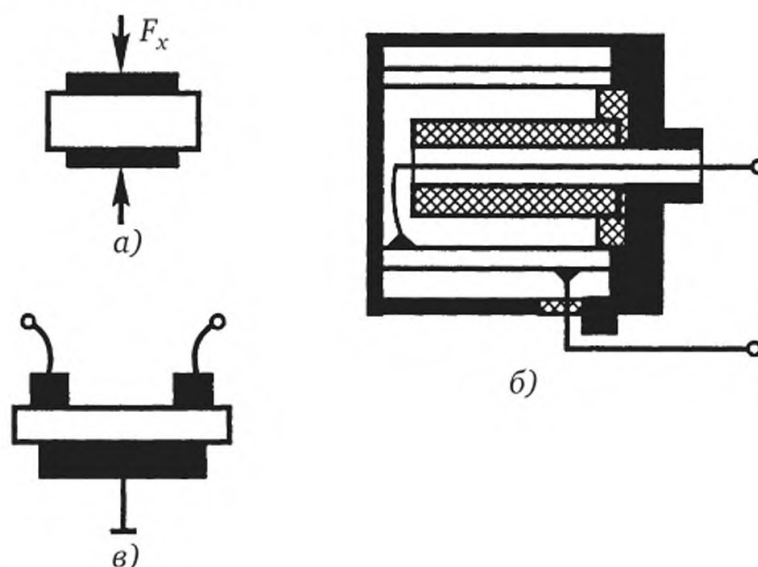


Рис. 3.2. Принципиальные схемы пьезоэлектрических преобразователей

На рис. 3.2, в изображен преобразователь, в котором используются как прямой, так и обратный пьезоэлектрические эффекты. Это пьезорезонаторы, имеющие максимальный коэффициент преобразования одного вида энергии в другой на той или иной определенной резонансной частоте и резко уменьшающие свой коэффициент преобразования при отклонении от этой резонансной частоты. Такие пьезоэлектрические преобразователи применяются в качестве резонансных фильтров, пропускающих узкую полосу частот.

Пьезорезонаторы, включенные в цепь положительной обратной связи усилителя (см. далее), работают в режиме автоколебаний и используются в качестве задающего генератора колебаний. В зависимости от типа используемого кристалла и типа возбуждаемых колебаний пьезорезонаторы применяются в двух разновидностях:

- для обеспечения высокостабильной собственной частоты, не зависящей от внешних условий;
- для генерации колебаний с управляемой собственной частотой (управляемые пьезорезонаторы).

Управляемые пьезорезонаторы могут быть использованы в частотно-цифровых приборах как преобразователи различных, преимущественно неэлектрических, величин (давление, температура, ускорение и т. д.) в частоту электрических колебаний.

§ 3.2. Конструктивные принципы построения пьезодатчиков

Достоинствами пьезоэлектрических преобразователей являются их малые габариты, надежность в работе, простота конструкции, воз-

возможность измерения переменных, в том числе высокочастотных, величин, очень высокая точность преобразования механических напряжений в электрический сигнал.

Для кварца, который по своим упругим свойствам и структуре близок к идеальному кристаллу, преобразование механического напряжения в электрический заряд осуществляется с относительной погрешностью, лежащей в пределах от одной десятитысячной до одной миллионной. С развитием высокоточной электроники появилась возможность реализовать эту точность в широком частотном диапазоне.

Таким образом, пьезоэлектрические преобразователи являются наиболее точными преобразователями, используемыми для изготовления датчиков давлений, ускорений и сил.

На рис. 3.3 показаны типичные конструкции пьезоэлектрических датчиков ускорений. На рис. 3.3, а показан датчик ускорений, у которого все элементы крепятся к основанию 1, выполненному из титана. Рабочий элемент 2 состоит из двух включенных параллельно пьезопластин из кварца. Для измерения ускорений используется инерционная масса 3. С целью уменьшения габаритов датчика эта инерционная масса изготавливается из обладающего высокой плотностью (18 г/см^3), но легкообрабатываемого сплава ВМЗ-2. Сигнал с кварцевых пластин снимается с помощью выводов от прокладки 4 из латунной фольги. Эти выводы соединяются с кабелем 6. Кабель 6 крепится к основанию 1 с помощью специального разъема. Датчик закрывается крышкой 5, надеваемой (навинчиваемой) на основание 1. На основании 1 имеется цилиндрический выступ с нарезанной на нем резьбой. Он используется для крепления датчика на пластинчатой части контролируемого объекта с помощью навинчиваемой на него гайки. Масса датчика составляет 35 г. Рабочий диапазон измерения ускорений колеблется от 1 до 150 м/с^2 .

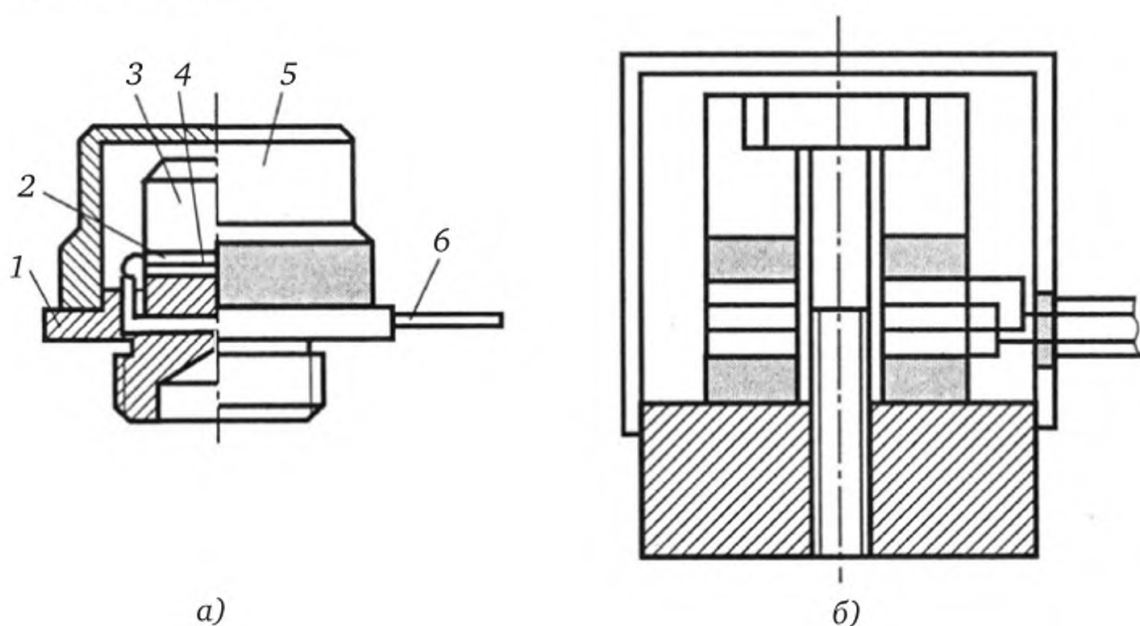


Рис. 3.3. Конструкции пьезоэлектрических датчиков ускорений

В акселерометрах, работающих в условиях больших вибраций, особое значение имеет надежность крепления пьезочувствительных элементов к основанию прибора и к инерционной массе. В конструкции, изображенной на рис. 3.3, а, это крепление осуществляется с помощью пайки. Высокие требования предъявляются также к кабелю, соединяющему датчик акселерометра с последующими элементами измерительной цепи (с усилителем). Эти требования таковы:

- большое сопротивление изоляции и ее надежность;
- наличие экранирующей оплетки и малая емкость между проводящей жилой и экранирующей оплеткой;
- гибкость и антивибрационная стойкость.

Величина распределенной по длине емкости между проводящей жилой и экранирующей оплеткой у современных кабелей, используемых для подключения пьезоэлектрических акселерометров, лежит в пределах 70...80 пФ/м.

Для обеспечения симметричности сопротивления связи пьезодатчик выполняется из нечетного числа пластин, соединенных так, как показано на рис. 3.3, б. Выводы подключаются к измерительному усилителю с симметричным входом.

Для повышения чувствительности пьезодатчиков их можно выполнять в виде батареи пьезоэлементов, соединенных с помощью металлических (фольговых) прокладок, как показано на рис. 3.4, а.

В пьезоэлектрических преобразователях используют также фольгированную с обеих сторон пьезоэлектрическую пленку, складывая ее «гармошкой» и после этого запекая ее, показано на рис. 3.4, б.

Увеличение чувствительности может быть достигнуто и за счет использования поперечного пьезоэффекта. Однако в этом случае тонкая пластинка, нагружаемая вдоль, может потерять устойчивость. Для повышения устойчивости применяется жесткая «коробчатая» конструкция, состоящая из трех вертикальных пластин, у которых внутренние и внешние обкладки соединены между собой. Это показано на рис. 3.4, в.

Высокой чувствительностью обладают пьезопреобразователи, работающие на изгиб. Пьезоэлемент, называемый в этом случае *биморфным*, состоит из двух пластин. При действии изгибающей силы верхняя пьезопластина испытывает растяжение, а нижняя — сжатие, в результате чего на этих пластинах появляются заряды противоположного знака. Благодаря металлическим накладкам и прокладкам соответствующие напряжения выводятся наружу преобразователя, а дальше могут соединяться в зависимости от направления в них положительных осей как параллельно (рис. 3.4, г), так и последовательно (рис. 3.4, д).

Вместо одной из пьезопластин может использоваться металлическая накладка существенной толщины, которая для предполагаемой нагрузки выбирается таким образом, чтобы пьезопластина вся оказывалась выше нейтральной линии. Это показано на рис. 3.4, е.

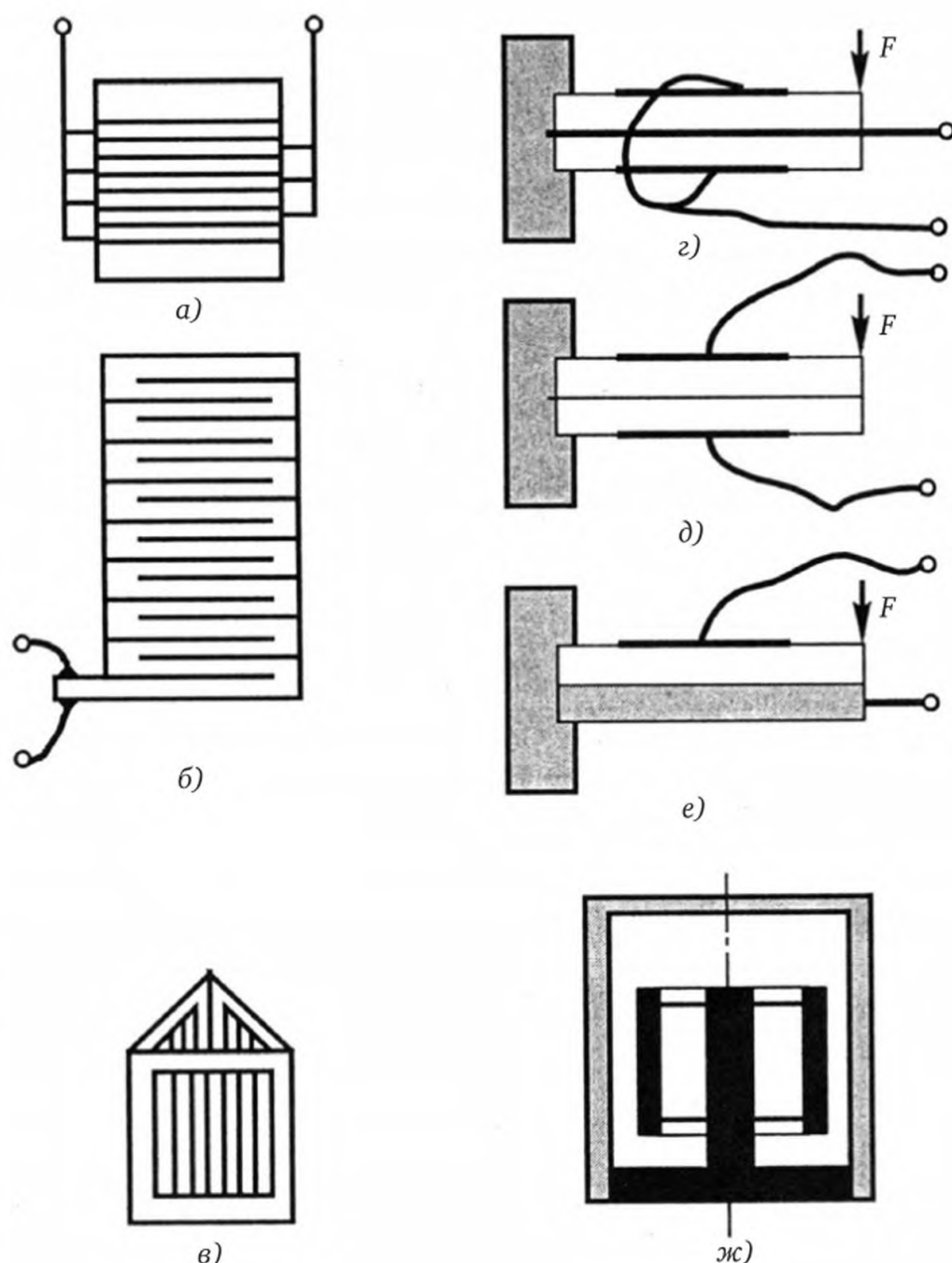


Рис. 3.4. Повышение чувствительности пьезодатчиков

Наконец, для повышения чувствительности используются также пьезоэлементы, работающие на сдвиг. Принципиальная схема конструкции датчика ускорений, использующего цилиндрический пьезоэлемент, работающий на сдвиг, показана на рис. 3.4, ж.

§ 3.3. Эффект Холла и его использование для построения датчиков

Преобразователь, использующий эффект Холла, является преобразователем, базирующимся на магнитных эффектах, и применяется для измерения напряженности магнитного поля. Подобные датчики

относятся к генераторным (активным), иными словами, они сами вырабатывают электрическое напряжение, однозначно определяющее характеристики измеряемого магнитного поля. Эффект Холла в разной степени имеет место у всех материалов. Практически же промышленные преобразователи реализуют на базе полупроводников. Сущность эффекта Холла показана на рис. 3.5.

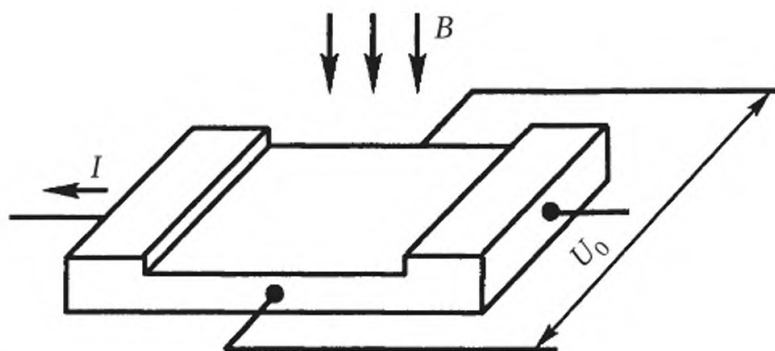


Рис. 3.5. Принцип действия преобразователей, основанных на эффекте Холла

Если пластина полупроводника единичной толщины помещается в магнитное поле с напряженностью B , а вдоль нее течет ток величиной I и при этом вектор напряженности электрического поля составляет прямой угол с вектором напряженности магнитного поля, то на движущиеся внутри этой полупроводниковой пластины носители заряда (электроны и ионы), образующие электрический ток, будет действовать сила, направленная вдоль плоскости их движения и перпендикулярная вектору напряженности магнитного поля. Это значит, что движение носителей заряда будет отклоняться от прямолинейного и на боковых гранях пластины возникнет разность потенциалов U_0 , определяемая выражением

$$U_0 = K_H IB,$$

где K_H — постоянная Холла, которая зависит от концентрации свободных носителей заряда в материале пластины. Ясно также, что для того чтобы эффект Холла проявлялся в наибольшей степени, толщина пластины преобразователя должна быть наименьшей.

В качестве полупроводниковых материалов для пластин датчиков, использующих эффект Холла, применяются обычно арсенид индия и фосфид-арсенид индия. Фосфид-арсенид индия используется при высоких температурах.

Существует три способа изготовления полупроводниковых пластин датчиков, использующих эффект Холла.

1. Пластина полупроводника отрезается от исходного куска материала, а затем травится до толщины 5...100 мкм. Затем ее приклеивают к подложке эпоксидной или полиэфирной смолой, которые хорошо заполняют трещины и обеспечивают хороший теплоотвод.

2. Полупроводниковый материал из паров осаждается на подложку, образуя слой толщиной 2...3 мкм. Такой способ получения тонких полупроводниковых пластин заданной конфигурации и на требуемой подложке применяется при изготовлении преобразователей, которые предназначены для эксплуатации при особо низких или особо высоких температурах.

3. Слой полупроводникового материала выращивается методом эпитаксии из газовой фазы на подложке, изготавливаемой из полуизолятора, чаще всего из арсенида галлия. Преобразователи, изготовленные таким способом, имеют высокую стабильность и используются для прецизионных измерений.

Подложка для преобразователей, основанных на эффекте Холла, должна при малой толщине иметь высокую жесткость, обладать хорошей теплопроводностью и высоким удельным сопротивлением. Температурные коэффициенты линейного расширения материалов полупроводниковой пластины и подложки должны быть примерно одинаковы.

Наиболее широко преобразователи, основанные на эффекте Холла, используются для измерения параметров постоянных, переменных и импульсных магнитных полей, а также для определения характеристик ферромагнитных материалов.

Такие преобразователи применяют также для измерения других физических величин, изменение которых легко преобразуется в изменение магнитной индукции. С их помощью можно измерять угловые и линейные перемещения, электрические токи и др.

Подключение как преобразователей, использующих эффект Холла, так и других датчиков к измерительной схеме целесообразно осуществлять с помощью бифилярной обмотки, обладающей небольшими значениями собственной емкости и индуктивности.

Пример использования эффекта Холла для построения датчика давления представлен на рис. 3.6.

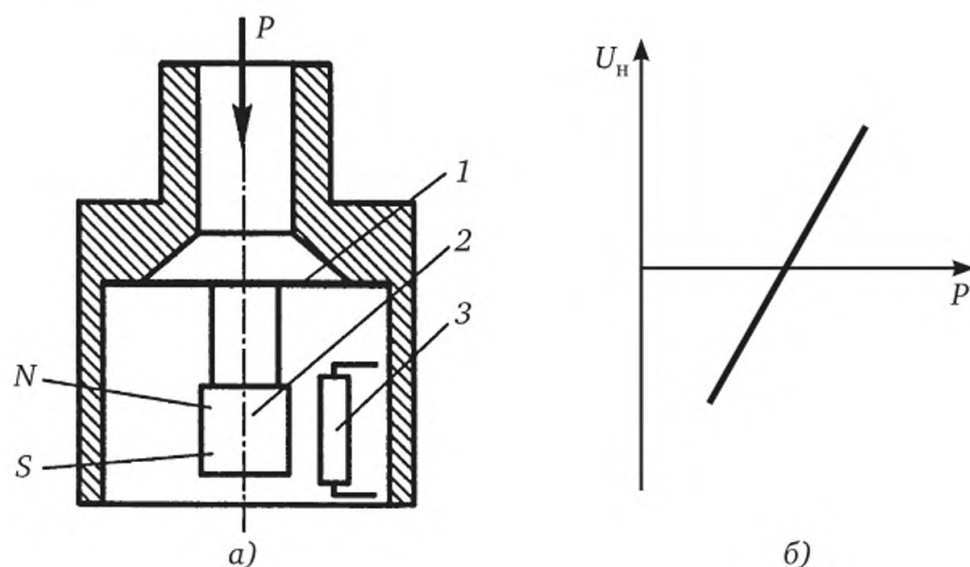


Рис. 3.6. Датчик давления, основанный на эффекте Холла

На рис. 3.6, а приведена принципиальная конструктивная схема датчика давления на основе эффекта Холла.

При повышении давления P постоянный магнит 2, размещенный на упругой мембране 1 датчика, перемещается относительно чувствительного элемента 3, основанного на эффекте Холла. В результате на обкладках датчика возникает выходное напряжение U_H порядка 0,5 В, в определенных пределах пропорциональное входному перемещению.

Линейная часть статической характеристики датчика показана на рис. 3.6, б.

§ 3.4. Области рационального применения пьезоэлектрических датчиков и датчиков, использующих эффект Холла

Области рационального применения пьезоэлектрических датчиков, а также датчиков, использующих эффект Холла, показаны на классификационной схеме рис. 3.7.



Рис. 3.7. Классификация областей применения пьезодатчиков и датчиков на основе эффекта Холла

Как уже говорилось, и пьезодатчики, и датчики, использующие эффект Холла, относятся к генераторным датчикам и реализуют активные методы измерений. Сигнал от датчиков такого рода поступает на так называемую компенсационную схему измерений.

Суть работы компенсационной схемы измерений состоит в том, что подбирается значение ЭДС источника, равное ЭДС, генерируемой датчиком. Факт равенства подбираемой и генерируемой датчиком ЭДС определяется по отсутствию тока в соответствующем контуре. Факт же отсутствия тока в контуре определяется по показаниям прибора, называемого *нуль-индикатором*. При этом не требуется измерять абсолютную величину протекающего тока, а требуется лишь определить факт равенства этого тока нулю. Этим обусловлена высокая чувствительность компенсационной схемы с нуль-индикатором.

Подобная компенсационная схема приведена на рис. 3.8.

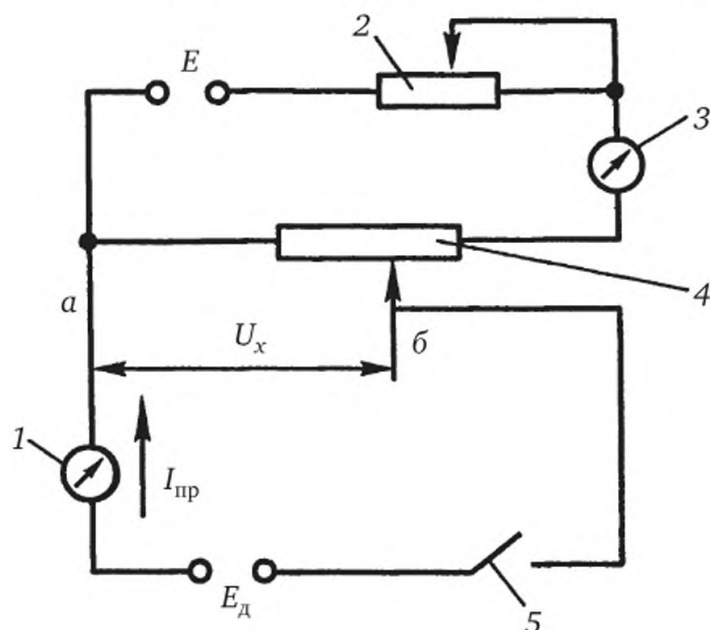


Рис. 3.8. Компенсационная схема для измерения сигналов с генераторных датчиков

На этой схеме: 1 — нуль-индикатор; 2 — настроечное сопротивление; 3 — измерительный прибор; 4 — компенсирующее сопротивление; 5 — ключ для подключения датчика к измерительной схеме.

После подключения источника компенсирующего напряжения E и начальной настройки прибора с помощью сопротивления 2, заключающейся в выборе среднего значения нулевой точки измерений, ключом 5 подключается генераторный датчик. Согласно второму закону Кирхгофа имеет место следующее соотношение: где R_{ab} — сопротивление между точками схемы a и b ; $R_{пр}$ — сопротивление нуль-индикатора; R_x — внутреннее сопротивление подключаемого генераторного датчика.

Изменяя сопротивление 4, добиваются, что при данном значении выхода датчика E_d ток $I_{пр}$ через нуль-индикатор равен нулю.

Это значит, что ЭДС, генерируемая датчиком, скомпенсирована и равна подобранному значению U_x . О величине U_x можно однозначно судить по показаниям измерительного прибора 3. Таким образом, следя за нуль-индикатором, можно точно снять показания с измерительного прибора.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается прямой пьезоэффект?
2. В чем заключается обратный пьезоэффект?
3. Является ли монокристалл природного кварца электрически нейтральным?
4. Что такое электрические оси пьезокристалла?
5. Что такое механические оси пьезокристалла?
6. Что такое оптическая ось пьезокристалла?
7. Что такое продольный пьезоэффект?
8. Что такое поперечный пьезоэффект?
9. Каковы преимущества пьезокерамики перед естественными пьезокристаллами?
10. Как пьезокерамика может приобрести пьезоэлектрические свойства?
11. Как пьезокерамика может потерять пьезоэлектрические свойства?
12. Каким образом и для измерения каких физических величин может использоваться прямой пьезоэлектрический эффект?
13. Каким образом и для измерения каких физических величин может использоваться обратный пьезоэлектрический эффект?
14. Каким образом и для измерения каких физических величин могут использоваться одновременно прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты?
15. Что такое пьезорезонаторы и каким образом они применяются?
16. Каковы основные достоинства пьезодатчиков?
17. Как обеспечивается симметрия сопротивлений связи с измерительной схемой?
18. Что такое фольгированная пьезопленка и каким образом она используется?
19. Что такое биморфный пьезоэлемент?
20. Что определяет, параллельно или последовательно соединяются между собой пьезопластины, образующие биморфный пьезоэлемент?
21. Как должна подбираться толщина металлической подложки, на которой устанавливается пьезопластина, работающая на изгиб?
22. Как используются пьезоэлементы, работающие на сдвиг?
23. Как обеспечивается устойчивость пьезопластинок при использовании поперечного пьезоэффекта?
24. В чем состоит эффект Холла?
25. Какие материалы используются для получения эффекта Холла?
26. Какие условия внешней среды определяют выбор полупроводникового материала для получения эффекта Холла?
27. В чем состоит метод получения тонких полупроводниковых пластинок для эффекта Холла при их отрезке от сплошного куска полупроводникового материала?
28. В чем состоит метод получения тонких полупроводниковых пластинок для эффекта Холла при их осаждении из паров на подложку?
29. В чем состоит метод получения тонких полупроводниковых пластинок для эффекта Холла с помощью эпитаксии из газовой фазы?
30. Каким образом датчик, использующий эффект Холла, применяется для измерения: постоянных магнитных полей? переменных магнитных полей? импульсных магнитных полей?
31. Как на основе пьезоэлектрических преобразователей строятся приборы для измерения давлений?
32. Как на основе пьезоэлектрических преобразователей строятся акселерометры?

33. Как на основе пьезоэлектрических преобразователей строятся приборы для измерения скорости?
34. Как на основе пьезоэлектрических преобразователей строятся приборы для измерения вибраций?
35. Как на основе преобразователей, использующих эффект Холла, строятся измерители смещений?
36. Как на основе преобразователей, использующих эффект Холла, строятся измерители положения?
37. Как на основе преобразователей, использующих эффект Холла, строятся измерители давления?
38. На основании использования какого закона электрических цепей строится компенсационная измерительная схема?
39. Как производится первоначальная настройка компенсационной измерительной схемы?
40. Для чего в компенсационных измерительных схемах применяется нуль-индикатор?
41. Для чего в компенсационную измерительную схему наряду с нуль-индикатором включается измерительный прибор?
42. Чем обеспечивается высокая чувствительность компенсационной измерительной схемы?

Глава 4

ЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

§ 4.1. Физические принципы построения емкостных преобразователей

Сущность работы емкостных измерительных преобразователей заключается в изменении под действием измеряемой физической величины их электрической емкости, что, в свою очередь, отражается на величине их выходного сигнала.

Электрическая емкость конденсатора, образованного параллельными пластинами, определяется по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r (n - 1) (A/d),$$

где n — число пластин; A — площадь одной стороны пластины; d — толщина диэлектрика, расположенного между пластинами; ε_0 — относительная диэлектрическая проницаемость этого диэлектрика; ε_r — диэлектрическая проницаемость вакуума, т. е. вполне определенная константа.

Существует три принципиальных способа для построения емкостных измерительных преобразователей.

На рис. 4.1, а показано изменение электрической емкости в зависимости от расстояния между пластинами конденсатора, а на рис. 4.1, б приведена статическая характеристика такого преобразования, т. е. зависимость $C = C(d)$. Эта характеристика представляет собой обратно пропорциональную (гиперболическую) зависимость.

На рис. 4.1, в показано дифференциальное изменение электрической емкости путем введения между пластинами конденсатора дополнительной металлической пластины, имеющей собственный электрический вывод, а на рис. 4.1, г приведена статическая характеристика такого преобразования, т. е. зависимости $C_1 = C_1(d)$ и $C_2 = C_2(d)$, где C_1 и C_2 — соответственно электрические емкости конденсаторов, лежащих выше и ниже средней металлической пластины.

На рис. 4.2, а показано изменение электрической емкости в зависимости от площади перекрытия (т. е. действующей величины A) пластин конденсатора, а на рис. 4.2, б приведена статическая характеристика такого преобразования, т. е. зависимость $C = C(A)$. Эта характеристика представляет собой прямую пропорциональную зависимость.

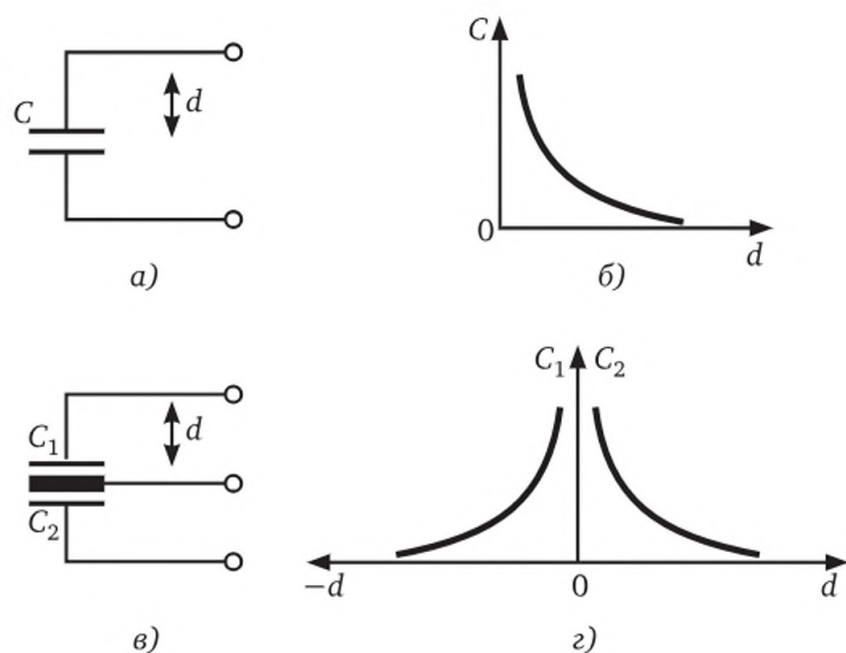


Рис. 4.1. Изменение электрической емкости конденсатора в зависимости от расстояния между его пластинами

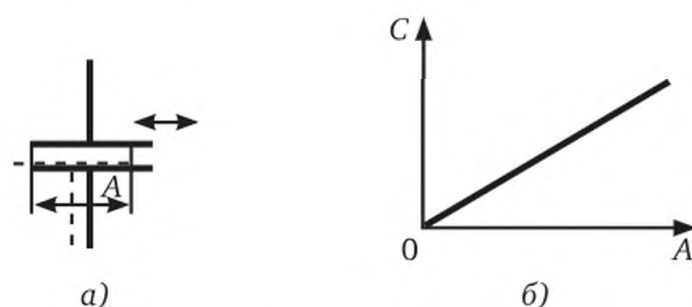


Рис. 4.2. Изменение электрической емкости конденсатора в зависимости от площади перекрытия его пластин

На рис. 4.3, а показано изменение электрической емкости изменением относительной диэлектрической проницаемости (введением и перемещением диэлектрика между пластинами конденсатора), а на рис. 4.3, б приведена статическая характеристика такого преобразования, т. е. зависимость $C = C(\epsilon_0)$. Эта характеристика представляет собой прямую пропорциональную зависимость, но начинающуюся не от начала координат, а от $\epsilon_0 = 1$ при $C = C_0$.

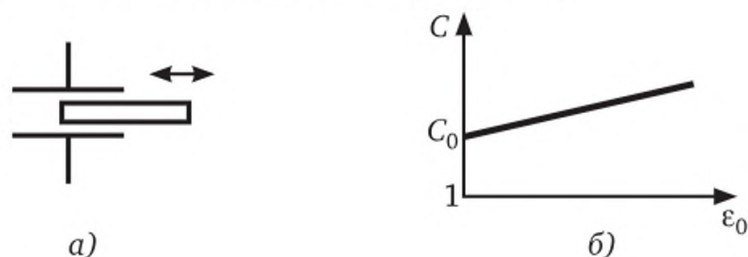


Рис. 4.3. Изменение электрической емкости конденсатора введением и перемещением диэлектрика между его пластинами

Максимальная чувствительность преобразователя имеет место, когда пластины максимально близки друг к другу. Однако принято считать, что расстояние между ними не может быть меньше, чем 100 мкм, поскольку пластины могут быть непараллельными, не плоскими и обладать излишней шероховатостью, а потому существует опасность их соприкосновения.

Для измерений смещений менее 1 мм применяют емкостные преобразователи с изменяющимся расстоянием между пластинами. Для измерения смещений, превышающих 1 мм, чаще всего используются преобразователи с изменяющейся площадью перекрытия пластин. Следует отметить, что в современных емкостных преобразователях обеспечивается возможность измерения перемещений порядка долей микрона.

Роль одной из пластин конденсатора может выполнять само изделие, перемещение которого подлежит измерению.

Емкостные преобразователи могут быть использованы как для статических, так и для динамических измерений, но применяются главным образом в стационарных условиях для проведения стендовых исследований и прецизионных измерений физических величин.

Эти датчики чувствительны к температурным колебаниям, изменению влажности. Они могут давать ошибочный или искаженный сигнал, если соединительные провода имеют большую длину и собственные емкость и индуктивность. Калибровка таких датчиков должна производиться вместе с кабелем.

Для подключения емкостных датчиков особенно важно использовать бифилярную обмотку, что позволяет при питании переменным током исключить влияние распределенной электрической емкости и индуктивности соединительного кабеля. Бифилярная обмотка в общем случае представляет собой витки из уложенных рядом проводников, обеспечивающих противоположное направление протекания тока, что ведет к уничтожению полей, создаваемых протекающими по виткам токами, а именно эти поля создают реактивное сопротивление соединительных кабелей. Таким образом, можно считать, что бифилярная обмотка обладает чисто активным омическим сопротивлением. Схема бифилярной обмотки приведена на рис. 4.4.

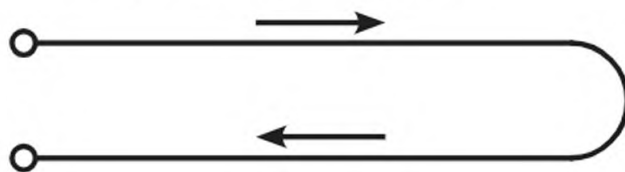


Рис. 4.4. Схема бифилярной обмотки

Для измерения емкостного сопротивления целесообразно использовать дифференциальную схему. По первому варианту дифференциальной схемы (рис. 4.5) и эталонное емкостное сопротивление 1 , и измеряемое емкостное сопротивление 4 включаются в электрические контуры, сим-

метрично питаемые переменным напряжением от трансформатора 2. При равенстве эталонного и измеряемого емкостных сопротивлений 1 и 4 противоположно направленные токи I_1 и I_2 в этих контурах будут равными по величине, так что результирующий ток через измерительный прибор 3 оказывается равным нулю, поскольку по первому закону Кирхгофа он равен алгебраической сумме токов I_1 и I_2 . В данном случае этот ток представляет собой разность модулей токов I_1 и I_2 . При изменении величины емкостного сопротивления показания измерительного прибора 3 будут отличаться от нуля и однозначно отображать это изменение емкостного сопротивления. Эта схема называется дифференциальной именно потому, что она основана на вычитании друг из друга токов I_1 и I_2 .

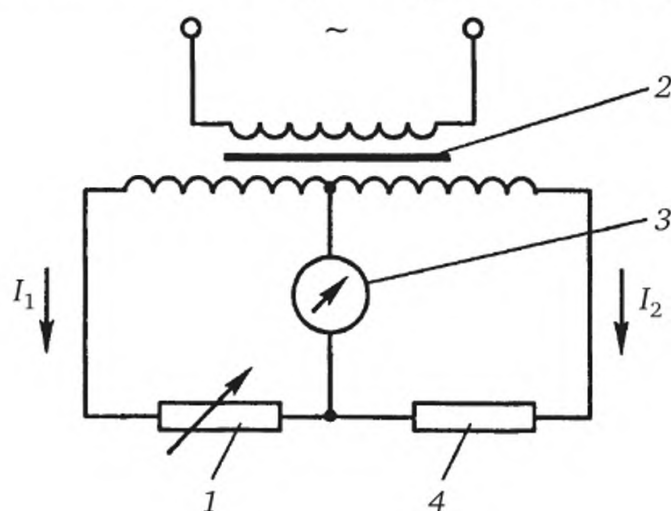


Рис. 4.5. Дифференциальная схема измерений емкостного сопротивления

Другой вариант измерения изменяющегося емкостного сопротивления с помощью дифференциальной схемы приведен на рис. 4.6. Здесь также происходит вычитание друг из друга модулей токов I_1 и I_2 , но изменение измеряемого емкостного сопротивления 4 компенсируется изменением напряжения E , снимаемого со вторичной обмотки трансформатора 2, так что ток через измерительный прибор 3 остается равным нулю. Величина ΔE , на которую нужно изменить исходное напряжение E , однозначно определяет величину изменения измеряемого емкостного сопротивления. Приравнивание к нулю тока через измерительный прибор позволяет использовать его как нуль-индикатор, что повышает точность измерений. Для этой цели и применяется такой вариант дифференциальной схемы.

§ 4.2. Конструктивные принципы построения емкостных датчиков механических величин

Емкостные датчики широко применяются для измерения таких механических величин как вибрации, перемещения, скорости, ускорения, усилия, крутящие моменты и давление.

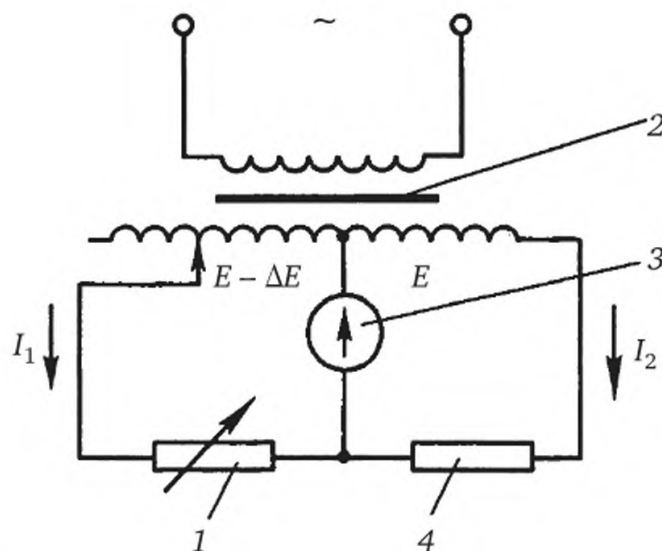


Рис. 4.6. Дифференциальная схема измерений емкостного сопротивления с нулевым током через измерительный прибор

Распространенным устройством, преобразующим акустические колебания окружающей воздушной среды в соответствующие электрические сигналы, является емкостный микрофон.

На рис. 4.7 представлена конструктивная схема емкостного микрофона, который содержит размещенные в корпусе 1 мембрану 2 из электропроводящего материала, неподвижную пластину 3, установленную на диэлектрике 4, и демпфирующий слой 5. При изменении акустического давления мембрана 2 деформируется и изменяется ее расстояние до пластины 3. В результате происходит изменение электрической емкости микрофона, что и используется.

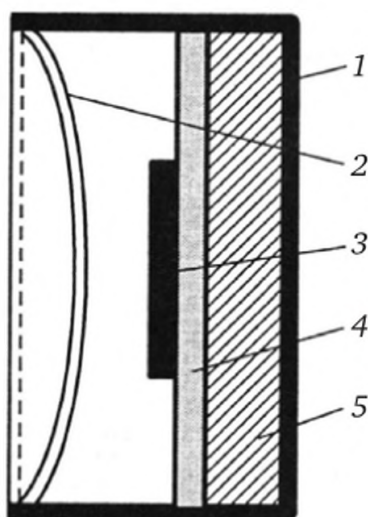


Рис. 4.7. Конструктивная схема емкостного микрофона

На рис. 4.8 изображена схема емкостного акселерометра. В корпусе 1 этого акселерометра на консольной балке 2 установлена инерционная масса 3, а на самом корпусе — изолированная от него неподвижная пластина 4. Под действием толчка или вибрации изменяется

расстояние между массой 3 и неподвижной пластиной 4 (это соответствует пунктирному изображению), а следовательно, и электрическая емкость всего преобразователя.

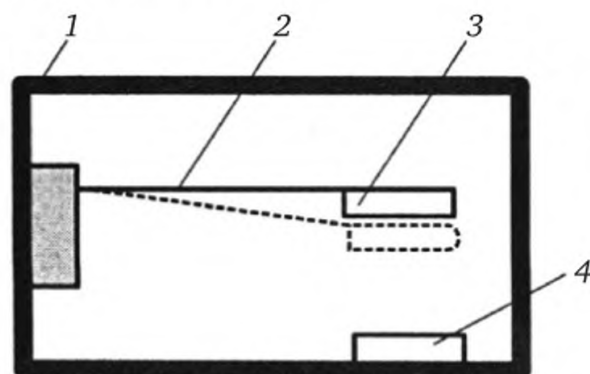


Рис. 4.8. **Схема емкостного акселерометра**

На рис. 4.9 показан емкостный преобразователь для измерения угла поворота вала. Здесь пластина 1 жестко закреплена на валу и перемещается относительно пластины 2 таким образом, что зазор между ними остается неизменным, а меняется площадь их перекрытия. Путем подбора формы пластин 1 и 2 можно получить любую функциональную зависимость между перемещением и емкостью. Преобразователи с переменным перекрытием применяются при измерении перемещений более 1 мм.

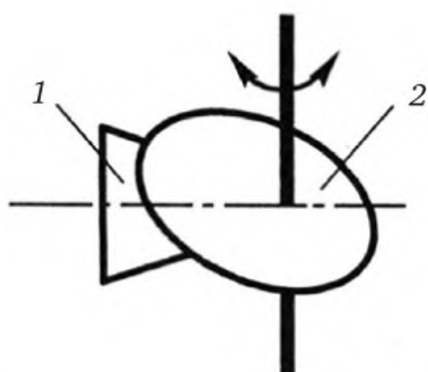


Рис. 4.9. **Схема емкостного датчика крутящего момента**

На рис. 4.10 изображен емкостный датчик силы. Здесь пластина 2 закреплена на пружинах 5 и 6 и может перемещаться параллельно самой себе непосредственно под действием измеряемой силы F . Пластины 1 и 3 неподвижны и изолированы от подложки и от корпуса. Если под действием измеряемой силы электрическая емкость между пластинами 2 и 1 увеличивается, то электрическая емкость между пластинами 2 и 3 уменьшается, и, наоборот, если под действием измеряемой силы электрическая емкость между пластинами 2 и 1 уменьшается, то электрическая емкость между пластинами 2 и 3 увеличивается. Это изменение электрических емкостей может быть снято с выводов 4 и подано на измерительный прибор.

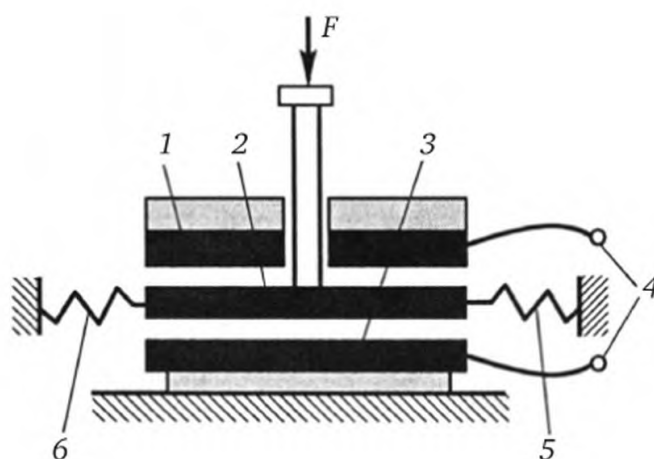


Рис. 4.10. Конструктивная схема емкостного датчика силы

§ 4.3. Конструктивные принципы построения емкостных датчиков уровня жидкости

Контроль уровня жидкости, особенно в труднодоступных местах и закрытых резервуарах, является одной из важнейших задач современной автоматизации технологических процессов. Это относится и к распространенным системам автоматизации и регулирования в водоснабжении и нефтегазовой промышленности, и к системам автоматизации в механообработке. Здесь различают два случая: когда жидкость, уровень которой измеряется и регулируется, является диэлектриком и когда эта жидкость является проводником.

На рис. 4.11 изображена конструктивная схема измерения уровня жидкости, являющейся диэлектриком, с помощью емкостного преобразователя.

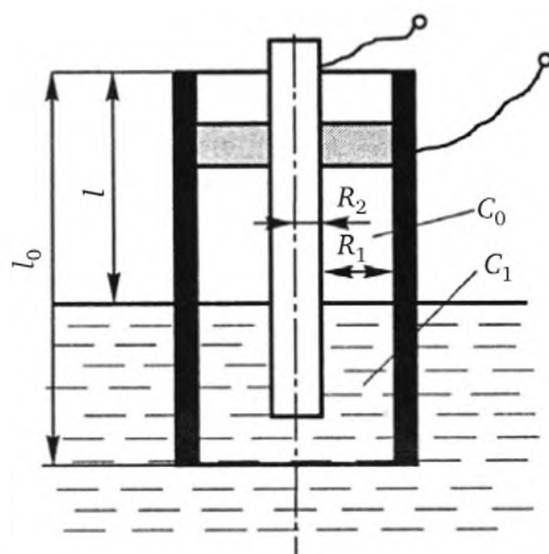


Рис. 4.11. Конструктивная схема емкостного измерения уровня жидкости-диэлектрика

В соответствии с этой схемой уровень жидкости-диэлектрика, например масла, измеряется с помощью емкостного преобразователя, состоящего из двух параллельно включенных конденсаторов. Один из этих конденсаторов образован частью электродов, имеющих отдельные выводы, а в качестве диэлектрика между этими электродами находится жидкость, уровень которой измеряется. Емкость этого конденсатора равна C_1 . Второй из этих двух параллельных конденсаторов, емкость которого равна C_0 , образуется остальной частью электродов, между которыми в качестве диэлектрика находится воздух.

Емкость всего преобразователя будет тогда рассчитываться по формуле

$$C = C_1 + C_0 = \{[l\varepsilon + (l_0 - l)\varepsilon_0] 2\pi\} / \ln(R_1 / R_2),$$

где l_0 — полная длина цилиндрического электрода; l — длина, на которую цилиндрический электрод заполнен диэлектрической жидкостью; ε — диэлектрическая проницаемость жидкости; ε_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха; R_1 — внутренний радиус внешнего цилиндрического электрода; R_2 — внешний радиус внутреннего цилиндрического электрода.

На рис. 4.12 приведена принципиальная схема измерений уровня электропроводящей жидкости. В соответствии с этой схемой в электропроводящую жидкость на глубину L погружается емкостный измерительный зонд. Этот зонд представляет собой электрод 1, покрытый стеклянной оболочкой 2. Другим электродом является электропроводящая жидкость 3, уровень которой измеряется. Она присоединяется к измерительной цепи с помощью проводящего зонда 4.

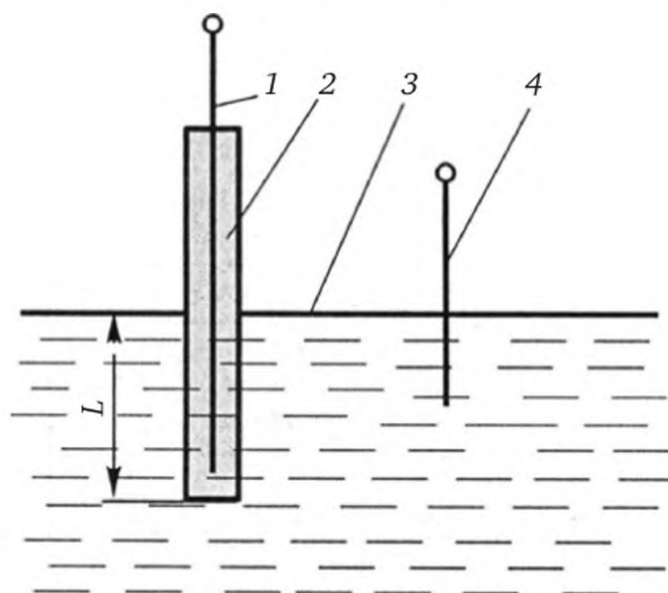


Рис. 4.12. Принципиальная схема емкостного измерения уровня электропроводящей жидкости

Электрическая емкость измерительного преобразователя в этом случае определяется по формуле

$$C = (L\varepsilon 2\pi) / \ln (R_1 / R_2),$$

где L — глубина погружения емкостного преобразователя; ε — диэлектрическая проницаемость стекла; R_1 и R_2 — внешний и внутренний радиусы стеклянного покрытия.

Вместо специального остеклованного электрода может быть использован просто кусок провода, покрытый изоляцией, которая не смачивается данной жидкостью.

§ 4.4. Конструктивные принципы построения емкостных датчиков параметров среды

Емкостные датчики широко применяются для измерения различных параметров окружающей среды. Одним из самых важных параметров такого рода является давление жидкости или газа. Пример конструкции высокочувствительного емкостного датчика для измерения давления показан на рис. 4.13.

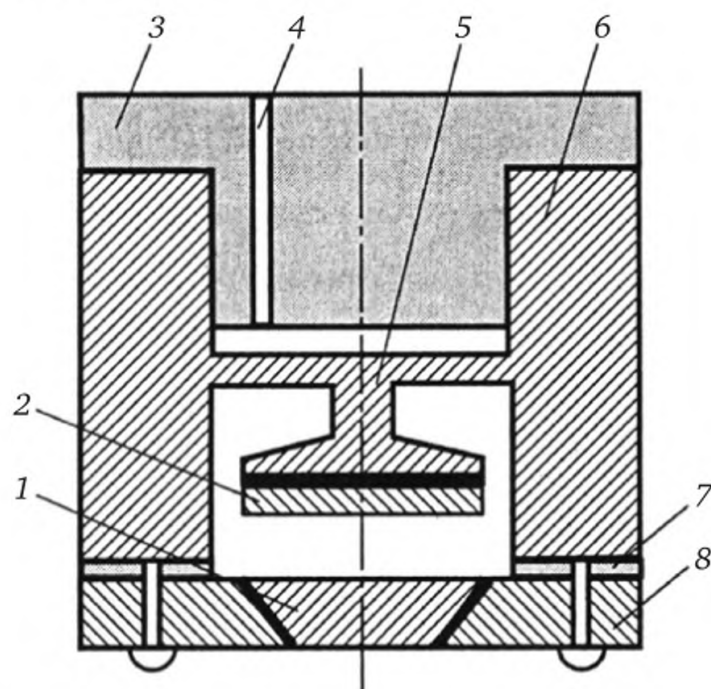


Рис. 4.13. Схема высокочувствительного емкостного датчика давления

В изображенном на рис. 4.13 датчике корпус 6 выполнен вместе с гибкой пластиной (мембраной) 5, которая через изолирующую прокладку, показанную жирной черной линией, соединена с подвижной пластиной 2. К корпусу на винтах крепится неподвижная пластина 1, которая изолируется от остальной массы с помощью изолирующей пленки (на рисунке эта изолирующая пленка показана жирной черной линией). Измеряемое давление поступает через канал 4 в пробку 3 в надмембранную камеру. Требуемая величина зазора между сопрягающимися плоскостями корпуса 6 и фланца 8 обеспечивается прокладкой 7,

которая имеет толщину 15...20 мкм. Диаметр пластин 1 и 2 составляет около 10 мм. Изменение зазора при номинальном диапазоне изменения давлений составляет порядка 8 мкм.

Область применения подобных емкостных преобразователей весьма широка. Чаще всего они используются для измерения перемещений и давлений.

При этом порог чувствительности составляет 10^{-14} м, а зазор между пластинами может быть сделан равным 5...10 мкм. Емкостные преобразователи работают при полном отсутствии шумов и самонагрева, а наиболее высокочувствительные из них используются для научных исследований.

Емкостные датчики используются также для измерения влажности. В этом случае датчик представляет собой конденсатор, состоящий из диэлектрической пленки, на обе стороны которой путем напыления наносятся электроды из золота. Емкость такого датчика оказывается примерно пропорциональной влажности окружающей среды, а его постоянная времени составляет около 2 мин.

Схема одного из промышленных образцов емкостного датчика влажности приведена на рис. 4.14. В соответствии с этой схемой на диэлектрическую пленку 4 методом напыления с двух сторон наносится тонкое золотое покрытие 3 и 5. К этим пленочным покрытиям припаиваются выводы 1 и 2, которыми датчик подключается к измерительной схеме.

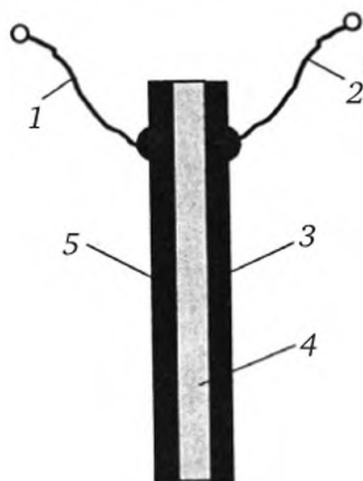


Рис. 4.14. Схема емкостного датчика влажности

Конструкция такого датчика приведена на рис. 4.15. На этом рисунке цифрами обозначены максимальные и минимальные размеры датчика.

В качестве еще одного примера емкостного датчика параметров можно привести датчик толщины диэлектрической ленты. Схема такого датчика приведена на рис. 4.16.

Измеряемая лента 3 протягивается с помощью роликов 1 и 4 между обкладками 2 конденсатора. Емкость этого конденсатора в данном случае определяется по формуле

$$C = S / [(\delta - \delta_0) / \epsilon_0 + \delta_d / \epsilon_d],$$

где δ — зазор между обкладками конденсатора; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха; S — площадь обкладок; $\delta_{\text{л}}$ — толщина ленты; $\epsilon_{\text{л}}$ — диэлектрическая проницаемость материала ленты.

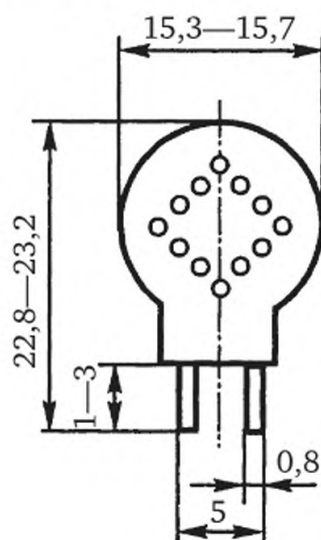


Рис. 4.15. Конструкция емкостного датчика влажности

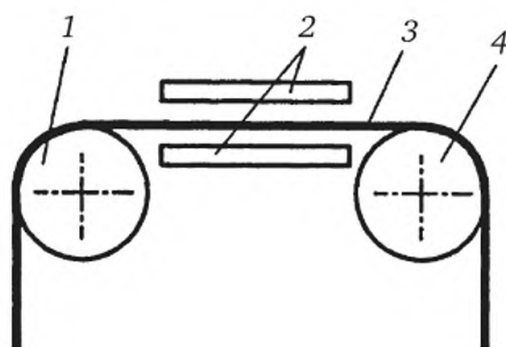


Рис. 4.16. Схема емкостного преобразователя для определения толщины диэлектрической ленты

Еще одним примером использования эффекта изменения емкости для измерения параметров среды могут служить так называемые *радиационные пирометры*.

Пирометром называют прибор для бесконтактного измерения особо высоких температур. Довольно часто применяются так называемые *яркостные пирометры*, т. е. пирометры, основанные на изменении спектральной интенсивности излучения тела, степень нагрева которого измеряется. Как правило, такой пирометр реагирует только на излучение с определенной длиной волны, например в красной области спектра на излучение с длиной волны $\lambda = 0,65$ мкм. Яркостный пирометр показывает не действительную температуру нагретого тела, а его яркостную температуру, т. е. температуру, которую имело бы абсолютно черное тело при той же спектральной интенсивности излучения. Поэтому при реальных измерениях наибольшую трудность представляет определение так называемого коэффициента черноты исследуе-

мого тела, который зависит от многих факторов: от состояния поверхности тела, от наличия на ней пленок и окислов и т. д.

Указанных недостатков лишены радиационные пирозлектрические преобразователи, основанные на смещении зарядов в некоторых кристаллах (например, в танталате лития) при их нагреве. Это показано на рис. 4.17.

При воздействии инфракрасного излучения 1 на такой преобразователь его кристалл 2 нагревается и с обкладок 3 этого кристалла снимается измерительный сигнал 4, как показано на рис. 4.17, а. Такой датчик сам по себе служит источником ЭДС, т. е. он является генераторным и может быть представлен как соединение емкостного датчика с генератором (см. рис. 4.17, б). В зависимости от подключения такого датчика используется либо ток через него, либо напряжение на нем, что показано на рис. 4.17, в.

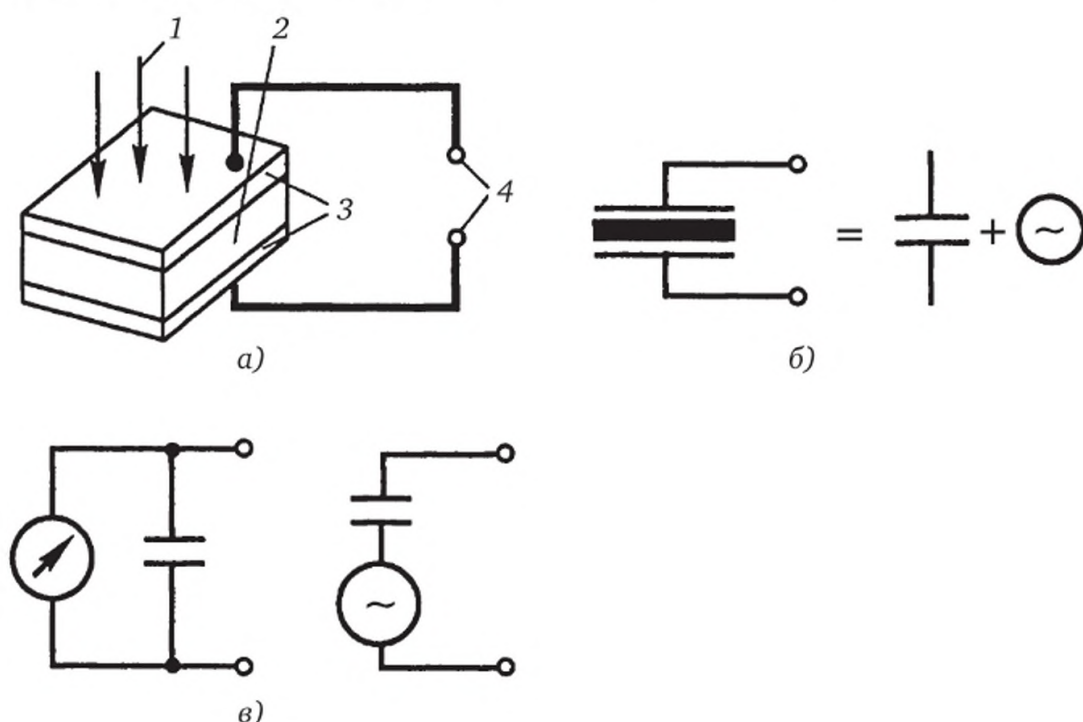


Рис. 4.17. Схема емкостного пирометрического преобразователя

Такие преобразователи широко используются в пожарных извещателях, системах контроля окружающей среды, реле близости в системах защиты работающего оборудования, для измерения импульсной мощности лазеров, а также в термографии для съемок предметов без освещения. При этом различается разница температур до 0,1 °С.

Контрольные вопросы

1. За счет изменения каких параметров можно изменять электрическую емкость конденсатора?
2. Может ли выполнять роль одной из пластин конденсатора поверхность измеряемой детали?

3. Какова статическая характеристика конденсатора с изменяющимся расстоянием между пластинами?
4. Какова статическая характеристика конденсатора с изменяющейся степенью перекрытия пластин?
5. Какова статическая характеристика конденсатора с изменяющейся диэлектрической проницаемостью среды между пластинами?
6. Следует ли производить калибровку емкостных датчиков совместно с соединительным кабелем?
7. Каковы основные свойства бифилярной обмотки и почему ее следует применять для подключения емкостных датчиков?
8. Какие существуют разновидности дифференциальной измерительной схемы?
9. Какую разновидность дифференциальной измерительной схемы следует применять для подключения емкостных датчиков?
10. Какие механические величины измеряют с помощью емкостных датчиков?
11. Каков принцип работы емкостного микрофона?
12. Каков принцип работы емкостного акселерометра?
13. Каков принцип работы емкостного преобразователя силы?
14. Каков принцип работы емкостного измерителя крутящего момента?
15. Как можно осуществлять функциональное преобразование при емкостном измерении крутящего момента?
16. Как можно осуществлять функциональное преобразование при емкостном измерении силы?
17. Как устроен высокочувствительный емкостный датчик давления?
18. Как устроен и работает емкостный датчик влажности?
19. Каковы основные конструкции емкостных датчиков влажности?
20. Как строятся емкостные датчики уровня диэлектрических жидкостей?
21. Как строятся емкостные датчики уровня проводящих жидкостей?
22. Как устроен и работает емкостный датчик толщины диэлектрической ленты?
23. Какими основными свойствами емкостных датчиков обусловлено их применение для высокоточных измерений параметров окружающей среды?
24. Чему может равняться порог чувствительности емкостного датчика перемещений?
25. Как строятся емкостные пленочные датчики влажности?
26. Какими могут быть габариты миниатюрных емкостных датчиков влажности?
27. Что такое яркостный пирометр?
28. Чем яркостная температура нагретого тела отличается от его действительной температуры?
29. Как устроен и работает емкостный пирометр?
30. Каковы области применения емкостных пирометров?
31. Каковы схемы подключения емкостных пирометров с выходом по току и напряжению?
32. Какой эквивалентной электрической схемой представляется радиационный пироэлектрический преобразователь?
33. Какие датчики используются в системах противопожарной сигнализации?
34. Какие температуры различаются с помощью пироэлектрического емкостного преобразователя?

Глава 5

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

§ 5.1. Основные свойства оптического излучения

Оптоэлектроника сочетает в себе оптические и электронные методы измерений. В настоящее время идет активное вытеснение традиционных датчиков волоконно-оптическими, которые обеспечивают стабильную работу в условиях сильных электромагнитных полей, а также в агрессивных и во взрывоопасных средах. На основе оптоэлектронных преобразователей созданы датчики давления, силы, перемещения, скорости, акустических параметров, напряженности электрического и магнитного полей.

На рис. 5.1 представлен спектр всех электромагнитных колебаний. Из рисунка видно, что видимый свет вместе с прилегающими к нему ультрафиолетовым (УФ) и инфракрасным (ИК) излучением составляет лишь небольшую часть всей полосы частот электромагнитного излучения. Эта полоса *оптических частот* относится к области измерений, которую принято называть *радиометрией*. Та часть радиометрии, которая относится только к *видимому свету*, называется *фотометрией*.

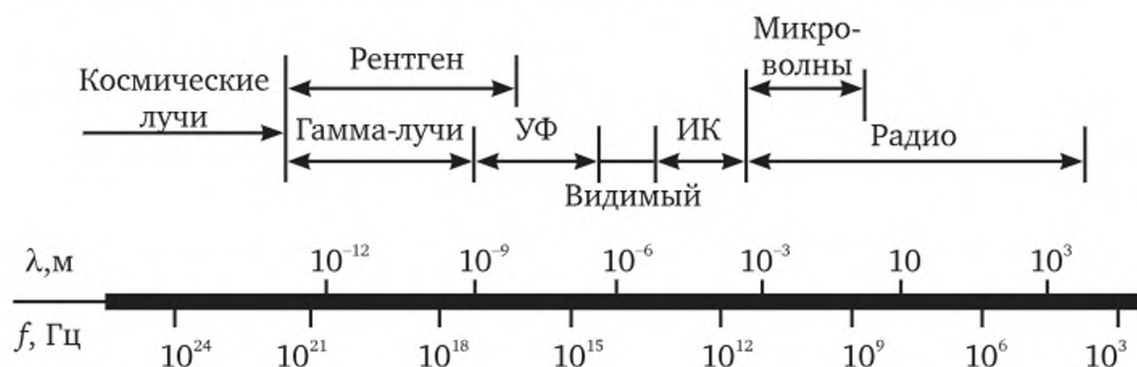


Рис. 5.1. Спектр электромагнитного излучения

На рис. 5.2 представлен спектр оптических излучений. Масштаб по вертикальной оси здесь не соблюдается (это невозможно). Поэтому следует руководствоваться цифрами, указанными на вертикальной оси.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны в диапазоне длин волн от 0,001 до 1000 мкм. Этот диапазон длин волн, в свою очередь, принято делить на три поддиапазона — ультрафиоле-

товую область, область видимого света и область инфракрасного излучения.

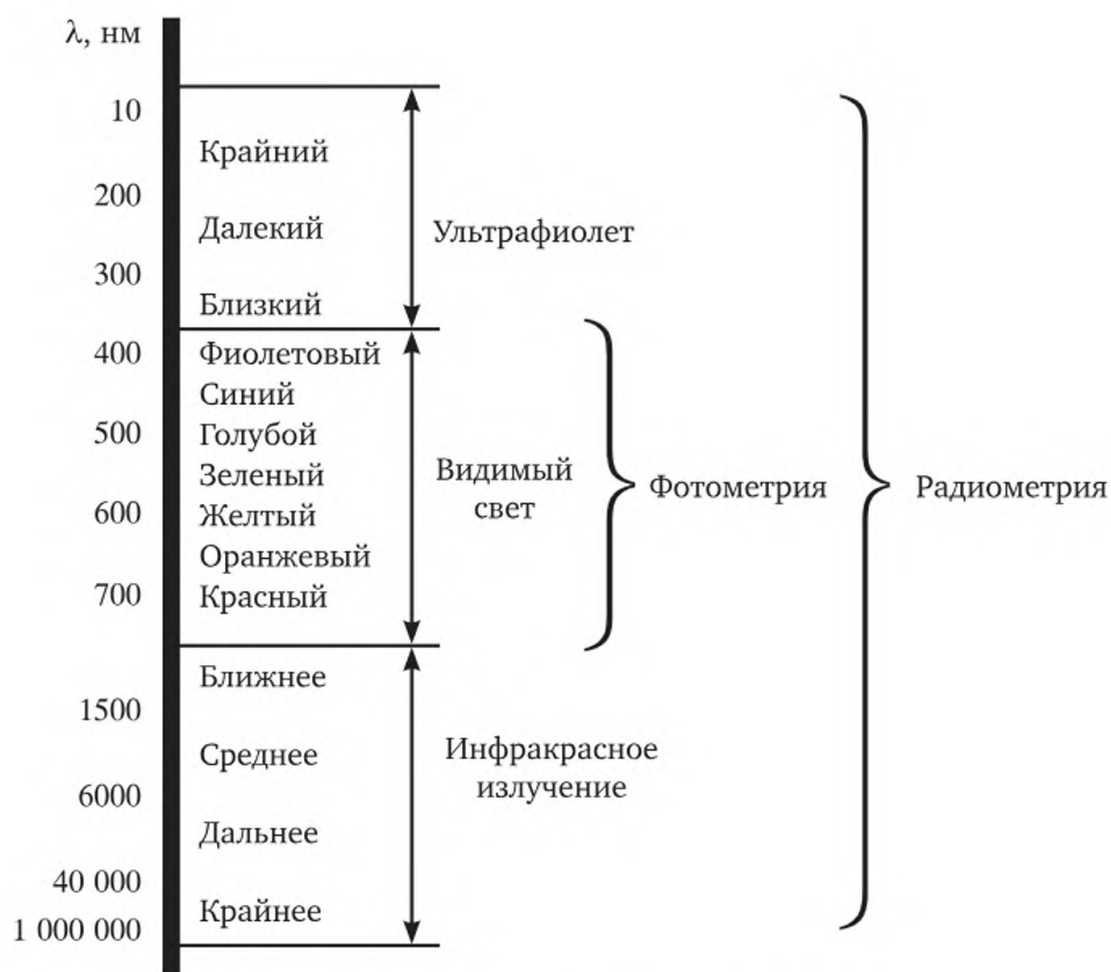


Рис. 5.2. Спектр оптического излучения

Ультрафиолетовая область делится на крайний ультрафиолет (длина волны равна 10...200 нм), далекий ультрафиолет (длина волны 200...300 нм) и ближний ультрафиолет (длина волны 300...370 нм).

Видимая область спектра составляет диапазон длин волн от 370 до 770 нм. Она является видимой для глаза человека и делится на цвета, основные из которых показаны на рис. 5.2.

Инфракрасное излучение лежит между видимой областью и микро-волнами и, в свою очередь, делится на четыре полосы, как показано на рис. 5.2.

Для описания оптических явлений используются три системы величин: энергетическая, световая и квантовая. В энергетической и световой системах основной единицей является поток излучения. В энергетической системе поток измеряется в ваттах, а в световой — в люменах. В квантовой системе свет рассматривается как поток частиц — квантов. Для характеристики оптических явлений здесь часто используют такое понятие, как «интенсивность света», под которым может пониматься и яркость света, и его сила, и величина потока и т. д.

Обычно световой поток состоит из излучений с различными частотами (представляет собой смесь различных цветов), но при создании оптических преобразователей желательно использовать световой поток, состоящий из излучения одной какой-либо частоты. Такой одночастотный поток называют *монохроматическим*.

Если волны отдельных излучений, из которых состоит поток, находятся в одной и той же фазе по отношению друг к другу, то такой поток называют *когерентным*.

Когда световой поток проходит через границу раздела двух сред, то его направление меняется, происходит так называемое *преломление света*. Показатель преломления для данной пары оптических сред определяется как отношение синусов угла падения (т. е. угла между направлением излучения и перпендикуляра к границе раздела сред, проведенным в точке падения) и угла преломления (подобного же угла, но после того, как излучение продолжит свой путь в другой оптической среде). Обычно показатель преломления в зависимости от пары используемых материалов и от длины волны света лежит в пределах 1...3.

Когда свет падает на какую-либо поверхность, часть его преломляется, часть отражается, а часть проходит сквозь среду, раздел с которой образует рассматриваемую поверхность. Коэффициент отражения меняется в зависимости от состояния и свойств этой поверхности и длины волны падающего света. Он колеблется от 98 % (для полированной поверхности, покрытой оксидом магния) до 1 % (для закопченной поверхности).

В том случае, когда высота шероховатостей отражающей поверхности оказывается меньше длины волны падающего на нее света, происходит так называемое *зеркальное отражение*. Для зеркального отражения характерно отсутствие рассеяния света.

В тех случаях, когда при отражении света преобладает его рассеяние, имеет место так называемое *диффузное отражение*.

Скорость света в среде для излучений с различными длинами волн также будет различной. Это приводит к так называемой *дисперсии* света.

В любой среде часть светового потока рассеивается и поглощается. Поглощенный свет в конечном итоге превращается в теплоту, так что освещаемое тело нагревается.

Коэффициент пропускания характеризует, какая часть светового потока, падающего на поверхность оптической среды, проникает в глубь этой среды. В зависимости от свойств среды и длины световой волны этот коэффициент меняется от нуля до 75 %.

Существует два основных метода измерения параметров оптического излучения: метод радиометрии и метод фотометрии.

Метод радиометрии позволяет определять энергию оптического излучения путем ее поглощения и преобразования в соответствующем датчике с последующим определением изменения температуры.

Метод фотометрии основан на зрительном ощущении изменений видимого света, и основным чувствительным элементом в этом случае является человеческий глаз.

§ 5.2. Источники и приемники излучения

Естественным *источником светового излучения* является солнце. Его световое излучение содержит непрерывный спектр от инфракрасной до ультрафиолетовой области.

В качестве источника светового излучения широко применяются лампы накаливания с вольфрамовой нитью, которые также имеют непрерывный спектр излучения, охватывающий видимую и инфракрасную области. У лампы накаливания нить помещается в стеклянную колбу и светится под действием пропускаемого через нее постоянного или переменного тока. При повышении температуры нити длина волны излучаемого ею света уменьшается, а интенсивность излучения возрастает. Управляя напряжением и током, протекающим через нить накаливания, можно прокалибровать лампу при любой заданной цветовой температуре. Лампа накаливания характеризуется пространственным распределением света, близким к сферическому, и в большинстве случаев может рассматриваться как точечный источник. Недостатком ламп накаливания является их слишком малый коэффициент полезного действия: только 2 % подводимой к ним электрической мощности преобразуется в видимое излучение.

Газоразрядные лампы представляют собой герметически закрытый кварцевый или стеклянный баллон со впаянными электродами, заполненный газом. В этом газе происходит электрический разряд, который сопровождается свечением. Газоразрядные лампы делятся на лампы непрерывного свечения и лампы импульсного разряда. Они характеризуются непрерывным спектром излучения с наложенными на него на определенных частотах линиями. Недостатком газоразрядных ламп являются их сравнительно большие габариты и сложность схем питания.

В настоящее время все более широкое применение получают лазерные источники излучения. Лазеры бывают газовыми, твердотельными и полупроводниковыми. Наибольшее распространение получили газовые лазеры, характеризующиеся монохроматичностью и поляризованностью излучаемого ими когерентного света.

Устройство лазера, работающего на углекислом газе, показано на рис. 5.3. Лазер состоит из охлаждаемой проточной водой разрядной трубки 1, внутри которой с помощью системы электродов 4 создается газоразрядная плазма 3. По торцам газоразрядной трубки размещаются зеркала резонатора: глухое зеркало 2 и полупрозрачное зеркало (или зеркало с отверстием) 5.

В настоящее время наиболее распространенными источниками излучения, которые используются в системах контроля и измерения,

являются светодиоды, принцип действия которых основан на генерировании светового излучения при рекомбинации электронов и дырок в полупроводниковом материале, как показано на рис. 5.4, а. Основные материалы, используемые для их изготовления, — арсенид и фосфид галлия.

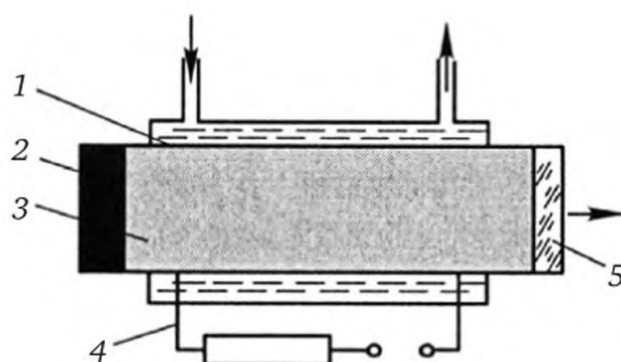


Рис. 5.3. Устройство лазера, работающего на углекислом газе, с диффузионным охлаждением

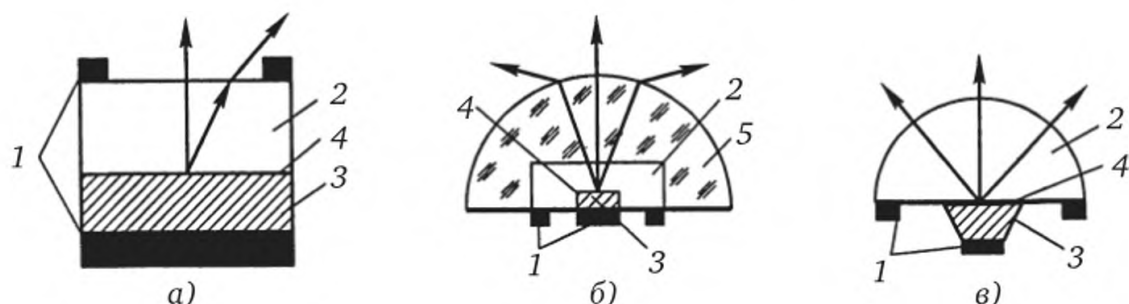


Рис. 5.4. Конструкции светодиодов:

1 — омические контакты; 2 — *n*-область; 3 — *p*-область; 4 — светоизлучающий *p-n*-переход; 5 — прозрачная пластмасса

Для уменьшения потерь энергии на поверхности полупроводника выполняют полусферическое покрытие из материала, коэффициент преломления которого имеет промежуточное значение между коэффициентами преломления воздуха и кристалла (рис. 5.4, б). Наиболее эффективны конструкции светодиодов, у которых *n*-область *p-n*-перехода имеет форму полусферы (рис. 5.4, в). В такой конструкции лучи генерируемого света подходят к разделу полупроводник — воздух перпендикулярно, что снижает потери на внутреннее отражение.

Светодиоды изготавливаются на основе эпитаксиальных структур путем формирования на поверхности исходной пластины из полупроводникового материала слоя, структура которого является продолжением структуры подложки. К эпитаксиальным структурам относятся структуры в системе AlAs — GaAs (красное свечение), двухслойные структуры на основе фосфида галлия GaP, дающие красное, зеленое и желтое свечение, а также двухпереходные структуры фосфида галлия с красным и зеленым цветом свечения. Омические контакты светоди-

одов изготавливают на основе тонкопленочных металлических покрытий, например Ni—Au—Sn, Ni—Au—Zn.

Светодиоды могут иметь габаритные размеры до $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ мм.

Параметры излучения зависят от излучателя и режимов излучения. Излучение может быть непрерывным, импульсным, а также в режиме одиночных импульсов. В режиме одиночных импульсов длительность одного импульса не превышает одной тысячной доли секунды, а интервал между импульсами может составлять десятки минут. Максимальная мощность излучения достигается именно в режиме одиночных импульсов.

Приемники излучения можно разделить на две группы: интегральные и селективные. К *интегральным* относятся приемники излучения, базирующиеся на преобразовании энергии излучения в температуру независимо от длины его волны. К *селективным* относятся фотоэлектрические преобразователи, настраиваемые на ту или иную определенную длину волны излучения. К ним относятся преобразователи, использующие явления внутреннего и внешнего фотоэффекта: фоторезисторы, фотодиоды, вакуумные и газонаполненные фотоэлементы, фотоумножители и т. п.

Тепловой приемник интегрального типа изображен на рис. 5.5. Интегральный тепловой приемник представляет собой металлический диск 2 и контактирующий с ним термочувствительный элемент 3, который измеряет фактическую температуру диска 2. Рабочая поверхность диска 2 покрывается слоем черни 1, который поглощает падающее на него излучение. Коэффициент поглощения черной поверхности практически равен единице в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения. Выходной электрический сигнал, поступающий на милливольтметр или на другую нагрузку, пропорционален мощности падающего на рабочую поверхность диска 2 излучения и не зависит от спектрального состава этого излучения.

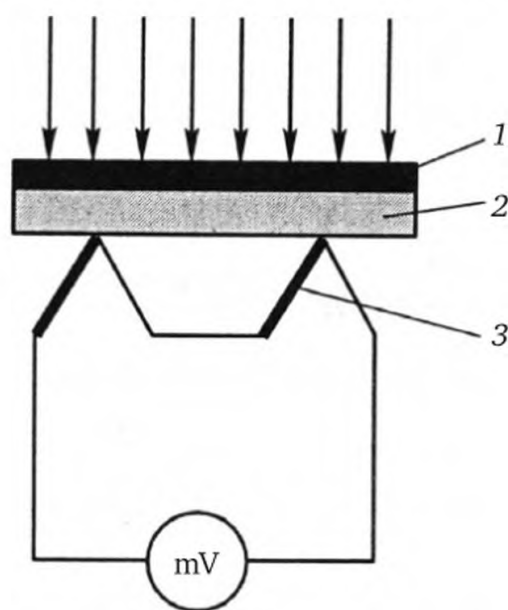


Рис. 5.5. Схема интегрального теплового приемника излучения

Существуют приемники излучения, выполненные в виде полоски из двух различных металлов, образующих термопару. Существуют также приемники излучения, выполненные в виде полоски или стержня из металла или полупроводника, который изменяет свое сопротивление в зависимости от температуры. В последнем случае такой преобразователь называется *болометром*.

Для повышения точности преобразования, достигаемого уменьшением потерь тепла на *конвекцию*, тепловой приемник может быть помещен в стеклянный баллон, из которого откачивается воздух. Чувствительность такого датчика возрастает в 10 раз и более. В баллоне предусматривается окно из кварца, прозрачного для ультрафиолетового и инфракрасного излучения.

Фотоэлементы с *внешним фотоэффектом* — это вакуумные и газонаполненные фотоэлементы и фотоумножители, в которых под воздействием светового излучения с поверхности фотокатода выбиваются электроны, увлекаемые внешним электрическим полем и создающие фототок. Вакуумные фотоэлементы представляют собой сферический стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого нанесен слой фоточувствительного материала, образующего фотокатод. Анод обычно выполняют в виде кольца или сетки из никелевой проволоки. Преобразование светового потока в электрический ток происходит практически без задержки (мгновенно).

В *фотоумножителях* первичный фототок усиливается за счет вторичной электронной эмиссии с промежуточных катодов, в которые ударяется поток электронов, усиленных электрическим полем, включенным между парами соседних катодов. Общий коэффициент усиления одного фотоумножителя может достигать сотен тысяч при практически безынерционном преобразовании. Поэтому фотоумножители используются для регистрации быстро протекающих процессов, где требуется высокая чувствительность. Схема подобного фотоумножителя представлена на рис. 5.6. Конструктивно такой фотоумножитель представляет собой стеклянный баллон, в котором размещены анод А, первичный катод К и вторичные (промежуточные) катоды Э₁, ..., Э₄ (эмиттеры).

Газонаполненные фотоэлементы позволяют получать токи, в несколько раз большие, чем в *вакуумных фотоэлементах*. Обычно стеклянные колбы заполняются инертными газами (неоном, аргоном, криптоном, ксеноном). При этом электроны, движущиеся к аноду, сталкиваются с молекулами газа и ионизируют их. В результате от катода к аноду начинает двигаться лавина электронов, а к катоду — лавина положительно заряженных ионов. Коэффициент газового усиления может достигать 6...7. Недостатком газонаполненных фотоэлементов является то, что максимальная амплитуда фототока достигается лишь спустя некоторый промежуток времени после начала освещения, поэтому такие элементы используются для регистрации световых потоков, изменяющихся с частотами не выше нескольких сотен герц.

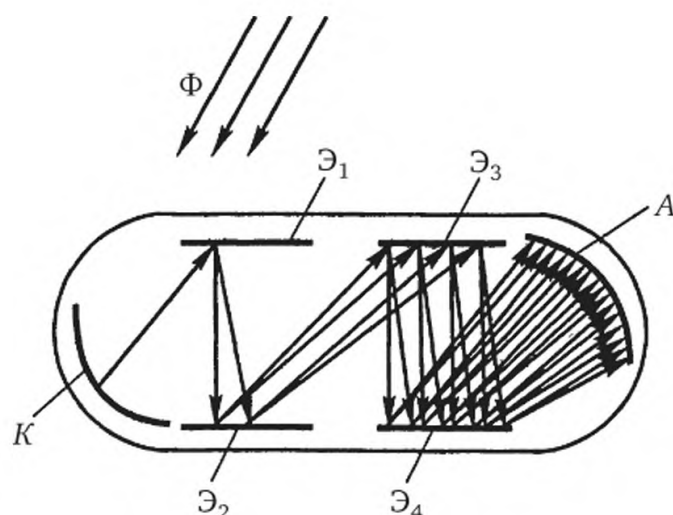


Рис. 5.6. Схема фотоумножителя

Фоторезисторы представляют собой полупроводниковую пластинку с контактами, которая при освещении в результате *внутреннего* фотоэффекта уменьшает свое сопротивление. В качестве полупроводникового материала используют сернистый свинец, селенид кадмия, сернистый кадмий и др. Фоторезисторы имеют самые различные конструкции: они могут быть выполнены герметичными, с жесткими или с мягкими выводами, кольцевой формы и др. Различные схемы фоторезисторов показаны на рис. 5.7.

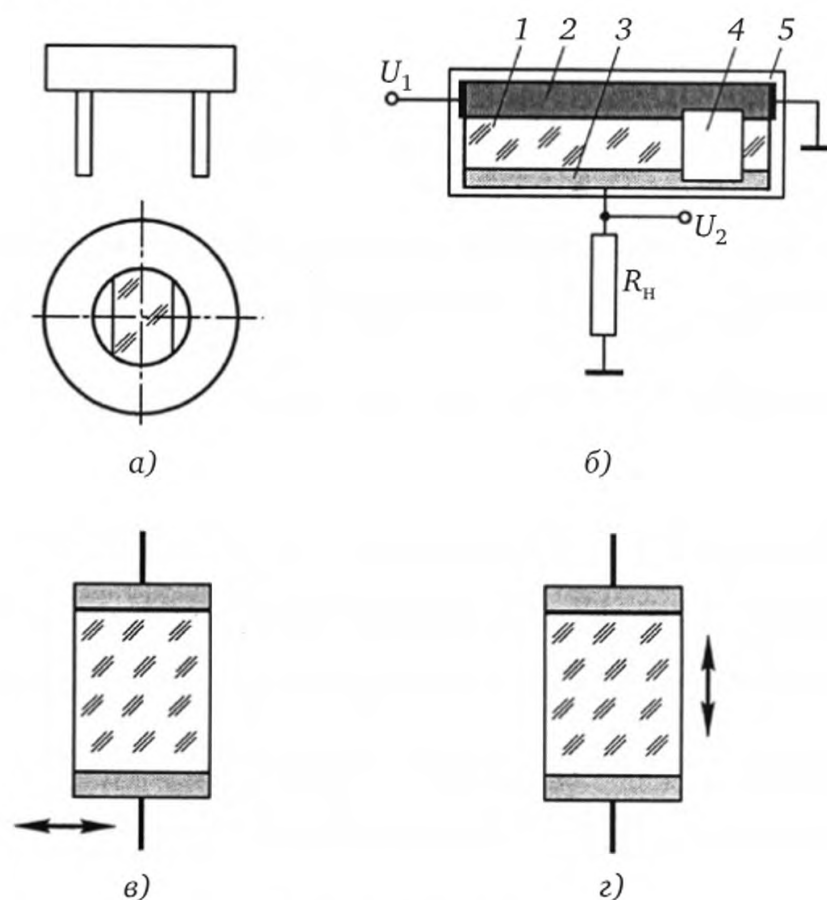


Рис. 5.7. Схема фоторезисторов

На рис. 5.7, а показан фоторезистор, который содержит пластмассовый корпус с рабочим окном, в котором размещен чувствительный элемент. На рис. 5.7, б показан фоторезистор, выполняющий функции бесконтактного делителя тока. На диэлектрической подложке 5 нанесены фоторезистивная полоса 1, высокоомный резистивный слой 2, низкоомный резистивный слой 3. Фоторезистор освещается световым зондом 4. К резистивному слою 3 подключено сопротивление нагрузки R_H . Фоторезистор питается напряжениями U_1 и U_2 .

Фоторезисторы применяются также и в преобразователях перемещений. В этом случае перемещение светового зонда возможно как в направлении, перпендикулярном электродам (рис. 5.7, в), так и в направлении, параллельном электродам (рис. 5.7, г).

Конструктивное исполнение фоторезисторов также может быть различным. Различные конструкции фоторезисторов показаны на рис. 5.8. На рис. 5.8, а изображен фоторезистор в стеклянном корпусе, на рис. 5.8, б — фоторезистор в металлическом корпусе, на рис. 5.8, в — в пластмассовом корпусе и на рис. 5.8, г — фоторезистор в планарном исполнении.

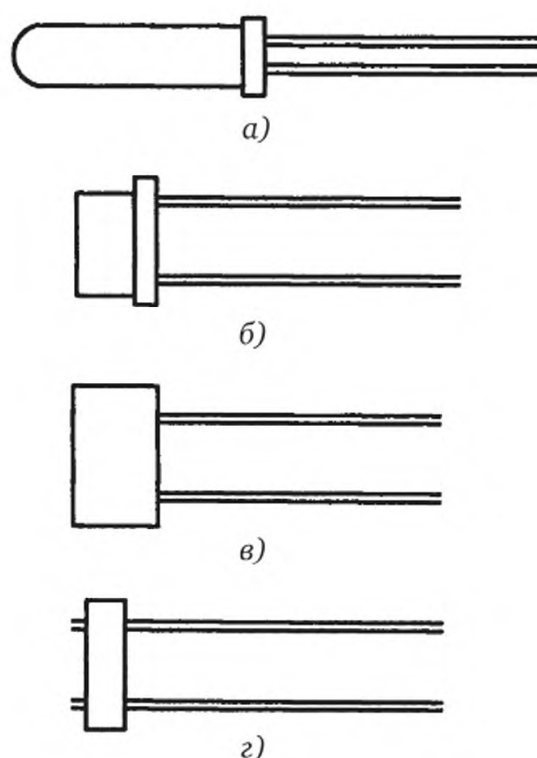


Рис. 5.8. Различные конструкции фоторезисторов

Фотодиоды и фототранзисторы относятся к полупроводниковым приемникам излучения. Фототранзистор представляет собой тот же фотодиод, снабженный усилителем фототока. Фотодиоды могут работать в двух режимах: фотогенераторном и фотодиодном. В фотогенераторном режиме отсутствует источник внешнего напряжения. В фотодиодном режиме имеет место подключение внешнего запирающего напряжения. При отсутствии облучения под действием этого

напряжения в измерительной цепи течет так называемый *темновой* ток, который, однако, обычно невелик. При освещении фотодиода ток в измерительной цепи увеличивается в зависимости от интенсивности облучения.

Пример использования фотоэлектрического датчика для регистрации механических колебаний приведен на рис. 5.9. Датчик содержит установленную на корпусе 1 с помощью плоскопараллельных пружин 2 инерционную массу 3, которая может перемещаться относительно платформы 4. Эта платформа жестко крепится на корпусе с помощью механизма ориентации 9. На платформе 4 жестко закреплен фотодиод 6, а на инерционной массе 3 жестко закреплен светодиód 5. Фотодиод 6 и светодиód 5 направлены навстречу друг другу, а их оси параллельны. С помощью болтов 8 весь датчик может быть закреплен на исследуемом объекте. Позицией 7 обозначены электрические провода для подвода напряжения к светодиóду 5. Их жесткость пренебрежимо мала по сравнению с жесткостью пружин 2. С помощью механизма ориентации 9 можно регулировать начальное взаимное расположение светодиóда 5 и фотодиода 6, добиваясь наибольшей чувствительности датчика.

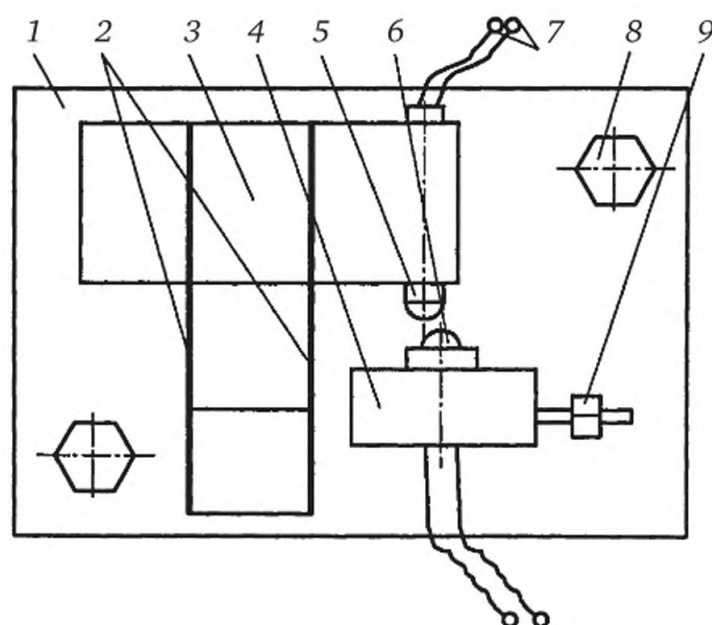


Рис. 5.9. Датчик механических колебаний на базе фотоэлектрического преобразователя

При смещении инерционной массы 3 относительно корпуса 1, вызванном колебаниями последнего, происходит изменение взаимного расположения светодиóда 5 и фотодиода 6, что приводит к изменению электрического сигнала на выходе датчика пропорционально амплитуде колебаний инерционной массы 3.

Такой датчик позволяет измерять абсолютные колебания объектов в области низких частот (20...40 Гц) с точностью до 0,01 мкм. Он используется при исследовании балансировки шпинделей особо точных станков.

§ 5.3. Волоконная оптика

В настоящее время в технике связи взамен традиционных кабелей, волноводов и радиоканалов во все большем масштабе начинают применяться волоконно-оптические световоды. В качестве источников света чаще всего используют светодиоды и полупроводниковые лазеры, а в качестве приемников — полупроводниковые фотодиоды. По сравнению с обычными медными кабелями световоды имеют значительно меньшие размеры и вес. Они нечувствительны к промышленным и другим помехам от электрических и магнитных полей, которые создаются различного рода электрическими машинами и аппаратами. Такие коммуникации характеризуются значительно более широкой полосой пропускания и меньшим поглощением. Оптические волокна изготавливают из доступного и сравнительно дешевого материала, например из кварца. Следует отметить, что вследствие того, что от волоконно-оптического кабеля трудно сделать ответвление, линии связи на таких каналах обладают повышенной закрытостью и используются в ответственных системах передачи информации.

В основе передачи светового сигнала по оптическому волокну лежит явление полного внутреннего отражения, которое иллюстрирует рис. 5.10.

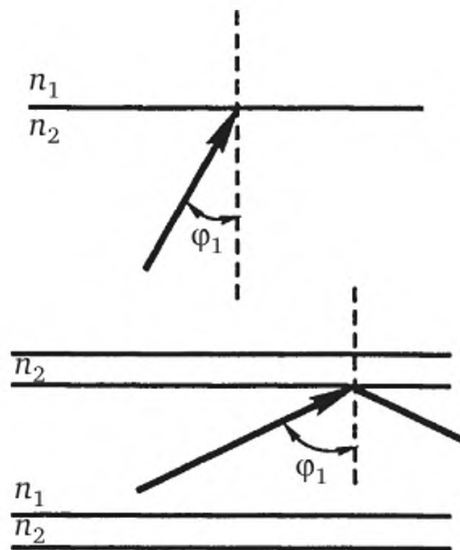


Рис. 5.10. Распространение светового излучения в оптическом волокне

Если свет пересекает границу двух сред, имеющих разные показатели преломления n_1 и n_2 , т. е. из среды с показателем преломления n_2 он поступает в среду с показателем преломления n_1 , то при определенном угле падения φ_1 пучок света полностью отражается в ту среду, из которой он пришел. При этом должны выполняться следующие условия:

$$\begin{aligned} n_2 &< n_1, \\ \varphi_1 &> \arccos(n_2/n_1). \end{aligned}$$

Минимальный угол, при котором происходит полное внутреннее отражение, равен:

$$\varphi_0 = \arccos (n_2/n_1).$$

Это явление используют в волоконных световодах. Световод выполняется в виде сердцевины, покрытой оболочкой, причем показатель преломления у материала оболочки выше, чем у сердцевины. При полном внутреннем отражении коэффициент отражения превышает 99,7 %. Для сравнения заметим, что коэффициент отражения у посеребренного зеркала составляет примерно 80 %.

Для передачи световых сигналов в основном используют излучение с длиной волн 850 и 1300 нм. Более длинные волны обеспечивают меньшие потери и более широкую полосу пропускания, но источники и приемники сигналов на этих волнах более дороги и сложны в изготовлении.

Волоконные кабели могут быть одно- и многожильными, а диаметры волокон обычно составляют 50, 100, 200 и 300 мкм.

Если световой сигнал состоит из волн разной длины, то это приводит к искажению сигнала, поскольку волны разной длины проходят различный путь. Искажения сигналов уменьшаются при использовании так называемых *градиентных* волокон, у которых имеет место плавное изменение показателя преломления от центра к периферии поперечного сечения волокна. Градиентное волокно можно приближенно представить как состоящее из ряда слоев со скачкообразным изменением показателя преломления на границе каждого слоя при его неизменном значении внутри каждого слоя. В градиентных волокнах искажения импульсов уменьшаются примерно в 200 раз. При этом имеет место также расширение полосы пропускания.

Оптические волокна могут состоять из стеклянных сердцевин и оболочки, кварцевой сердцевин и пластмассовой оболочки, а также пластмассовых сердцевин и оболочки. Пластмассовые волокна довольно легко соединяются между собой, достаточно прочны, но обладают высоким поглощением. Стеклянные волокна обладают наилучшими характеристиками по поглощению, но они менее прочны.

Для оптических волокон очень непростым оказался вопрос соединения между собой отрезков оптических кабелей. В настоящее время существует несколько способов такого рода соединений. Наиболее часто оптические волокна соединяют с помощью соединительной муфты; при этом концы соединяемых оптических волокон зачищают и крепят в концевых держателях, представляющих собой металлические стаканы. Концевые держатели вворачивают или вставляют в концентрическую направляющую муфту, выполненную в виде втулки. Такое разъемное соединение показано на рис. 5.11. При постоянном соединении концы оптических волокон сплавляют между собой или склеивают оптическим клеем.

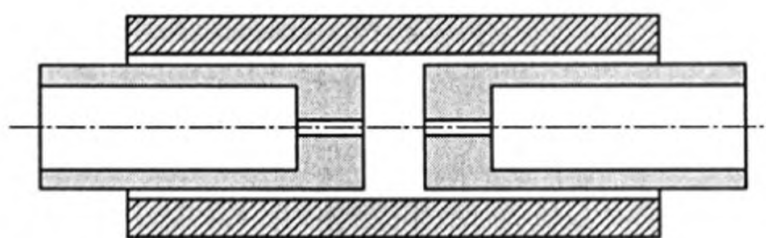


Рис. 5.11. Соединение оптических волокон металлической муфтой

При соединении оптических волокон возможны различные дефекты, которые распределены по группам и изображены на рис. 5.12. На рис. 5.12, а показано соединение, в котором концы световодов не соприкасаются друг с другом; на рис. 5.12, б — соединяемые световоды некоаксиальны; на рис. 5.12, в — сердцевины соединяемых световодов неконцентричны; на рис. 5.12, г — плоскости среза перпендикулярны осям волокон (по крайней мере, у одного из волокон); на рис. 5.12, д — оси волокон направлены под углом друг к другу; на рис. 5.12, е — концы волокон загрязнены или не обработаны, например не отшлифованы. При наличии какого-либо из названных дефектов будет иметь место большая погрешность при передаче сигнала, или же такая передача будет вообще невозможна.

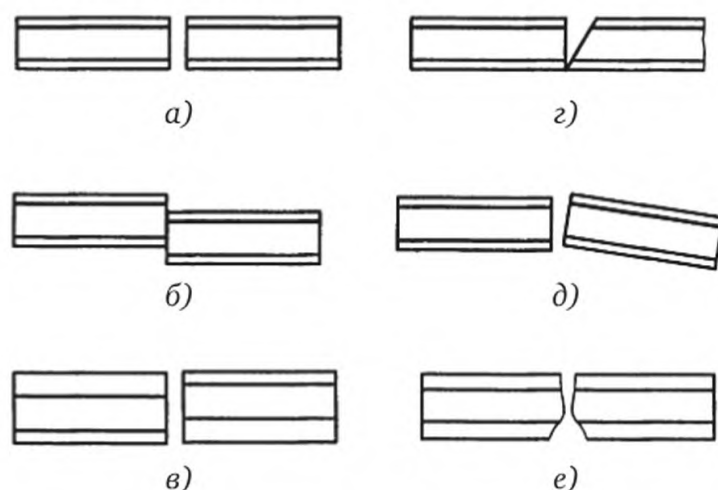


Рис. 5.12. Возможные дефекты при соединении световодов

Таким образом, в общем случае структурная схема оптоэлектронного преобразователя содержит источник излучения, оптический канал передачи сигнала, приемник излучения и измерительную цепь. Измеряемая величина может воздействовать непосредственно на источник излучения или на оптический канал, моделируя соответствующий параметр потока в процессе распространения излучения.

Наиболее часто под воздействием измеряемой величины изменяется интенсивность светового потока. Кроме того, могут изменяться фазовый сдвиг между колебаниями в двух лучах, вызываемый разностью длин их оптического хода, а также длина волны и частота излучения, генерируемого источником.

Соответственно все оптоэлектронные приборы можно разделить на три группы: для измерения интенсивности излучения, для измерения сдвига фаз и угла поворота плоскости колебаний и для измерения частоты и длины волны оптического излучения.

При проектировании и использовании оптоэлектронных преобразователей необходимо учитывать потенциальные потери в световодах, которые могут быть вызваны следующими причинами:

- поглощение света за счет примесей ионов металлов, таких как железо, медь, никель, хром, кобальт и магний;
- рассеяние светового потока из-за неоднородности распределения молекул в стекле и на поверхности раздела сердцевины и оболочки;
- изгибы волокон в оптическом кабеле недопустимо большой кривизны.

Волоконно-оптические датчики, принцип действия которых основан на измерении интенсивности излучения, не требуют использования когерентного излучения и не требуют использования специальных приемников излучения, поскольку амплитудно-модулированный световой сигнал в этом случае может непосредственно восприниматься и далее измеряться с помощью обычного фотодиода.

§ 5.4. Основные конструктивные схемы оптоэлектронных преобразователей

В механообрабатывающем производстве и в соответствующих исследованиях наиболее удобно применять *амплитудную модуляцию* оптического излучения.

Амплитудная модуляция оптического излучения может быть осуществлена за счет:

- ослабления светового сигнала в среде при изменении коэффициента поглощения;
- изменения поперечного сечения оптического канала;
- генерации дополнительного излучения при воздействии измеряемого физического фактора;
- изменения отражательной или поглощательной способности при изменении показателя преломления или при нарушении полного внутреннего отражения.

В автоматизированном производстве контроль качества обработанной поверхности осуществляется с помощью *датчиков шероховатости*, принцип действия которых основан на рассеянии светового луча.

На рис. 5.13 показана принципиальная схема датчика контроля шероховатости, который работает следующим образом. Пучок света, испускаемый инфракрасным светодиодом 8, с помощью линзы 7 и объектива 3, проходя через полупрозрачное зеркало 6, фокусируется на поверхности контролируемой детали 4. Отраженный от поверхности контролируемой детали свет 5 снова проходит через систему

линз объектива 3, попадает на полупрозрачное зеркало 6 и направляется им на датчик изображения 2. Датчик изображения 2 преобразует поступивший на него световой поток в распределение интенсивности света 1, что позволяет однозначным образом судить о параметрах шероховатости контролируемой детали.

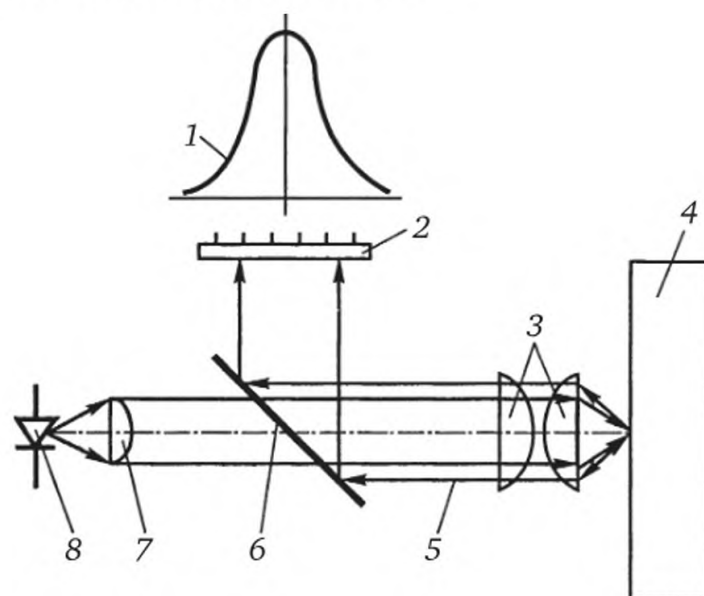


Рис. 5.13. Принцип работы светового датчика шероховатости

В современных системах управления технологическими процессами бесперебойный автоматический режим работы обеспечивается поступающими непосредственно с датчиков сигналами корректировки. Например, с помощью оптического датчика осуществляют автоматическое управление процессом шовной сварки. Такой датчик работает по методу отражения падающего света от свариваемого шва. Отраженный свет используется для контроля и корректировки параметров технологического процесса.

Оптические методы довольно широко используются для измерения давлений. Схема простейшего оптического датчика, применяемого для измерения колебаний давления в трубопроводах, приведена на рис. 5.14.

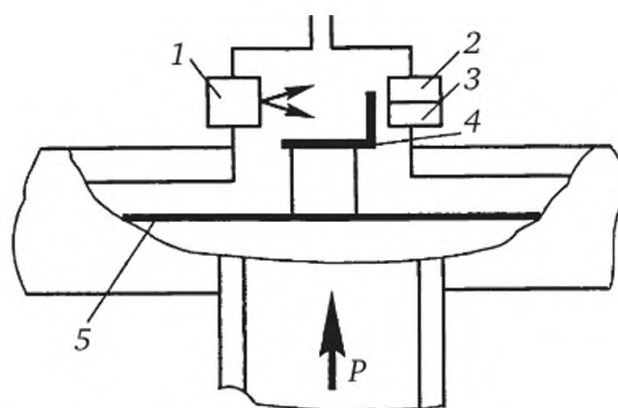


Рис. 5.14. Схема простейшего оптического датчика давления

В соответствии с рис. 5.14 между светодиодом 1 и двумя фотоприемниками 2 и 3 размещена шторка 4, перекрывающая поток излучения, который падает на один из фотоприемников 2 или 3. Шторка 4 жестко установлена на эластичной мембране 5, воспринимающей измеряемое давление. Для того чтобы произвести перекрытие светового потока между светодиодом 1 и фотоприемниками 2 и 3, достаточно перемещения шторки 4 на доли миллиметра.

Для измерения акустических волн в жидкости применяют датчики более высокой чувствительности и с более высокими динамическими качествами. Пример такого датчика показан на рис. 5.15.

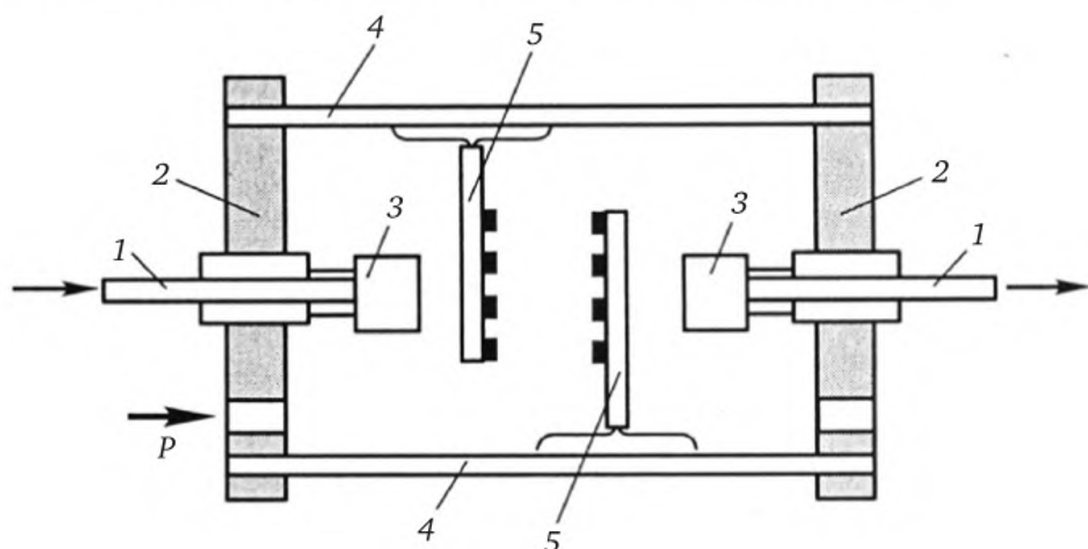


Рис. 5.15. Схема чувствительного высокочастотного оптического датчика давления

Здесь для модуляции светового потока применены специальные дифракционные решетки 5, закрепленные на эластичных диафрагмах 4. Излучение от подводящего световода 1 проходит через коллиматор 3, где оно преобразуется в поток параллельных лучей. Затем это организованное световое излучение проходит через две дифракционные решетки 5, после чего вводится в приемный световод 1 через коллиматор 3, аналогичный тому, который стоит на входе. Под действием давления P происходит перемещение диафрагм 4, а следовательно, и дифракционных решеток 5. В результате изменяется мощность излучения, которая передается от подводящего к отводящему световоду. Расстояние между плоскостями решеток выбирается в пределах $0,7 \dots 1,0$ мкм. Датчик может реагировать на смещение порядка $(3 \dots 4) \cdot 10^{-4}$ нм при рабочем диапазоне частот в пределах от 100 Гц до 5,5 кГц.

В автоматических устройствах часто применяется *оптический переключатель* с зеркальной шторкой, который изображен на рис. 5.16. Он может работать в *режиме пропускания* (рис. 5.16, а) и в *режиме отражения* (рис. 5.16, б).

При отсутствии электрического напряжения на электромагните 7 под действием пружины 4 железная шторка 5 с зеркалами опускается

в крайнее нижнее положение и энергия светового излучения прямо передается от световода 1 к световоду 6. При подаче электрического напряжения на обмотку электромагнита 7 железная шторка 5 с зеркалами, преодолевая пружину 4, притягивается к нему, и оптическое излучение, выходящее из световода 1, отражается в направлении световода 2. Одновременно сигнал со световода 3 передается в световод 6. Потери при отражении сигналов от зеркал шторки 5 практически отсутствуют. Указанные зеркала изготавливаются вакуумным напылением хрома и золота. Время переключения прибора составляет примерно 10 мс.

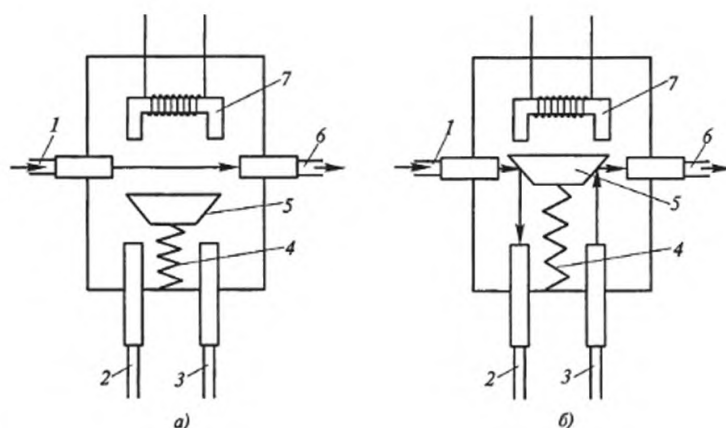


Рис. 5.16. Оптический переключатель с зеркальной шторкой

В качестве отражающей шторки может использоваться граница раздела «жидкость — воздух» или «жидкость — жидкость». Например, используют пузырьки ртути, находящиеся в заполненной электролитом емкости.

Оптоэлектронные методы часто применяют для контроля скорости потока жидкости или, что однозначно с этим связано, для построения оптических расходомеров. Идея построения таких расходомеров состоит в том, что любое колебание световода вызывает изменение интерференционной картины на выходе этого световода. Здесь возможны два решения: построение поперечных и продольных волоконно-оптических расходомеров.

На рис. 5.17 приведены схема поперечного волоконно-оптического расходомера (рис. 5.17, а) и его статическая характеристика (рис. 5.17, б).

В таком датчике поперек трубопровода 1 устанавливается оптическое волокно 2, нагруженное грузом (или усилием) 3. Под действием потока омывающей волокно жидкости оно будет совершать колебания, частота которых зависит от скорости движения потока.

В продольном волоконно-оптическом расходомере, который изображен на рис. 5.18, интерферометрический волоконный датчик установлен параллельно оси потока жидкости. Для повышения степени взаимодействия световода с потоком жидкости на нем устанавливают дополнительные лопасти. На рис. 5.18: 1 — световоды, 2 — трубо-

провод, 3 — дополнительные лопасти, 4 — установочные растяжки. Погрешность измерения такого рода датчиков лежит в пределах 5 %.

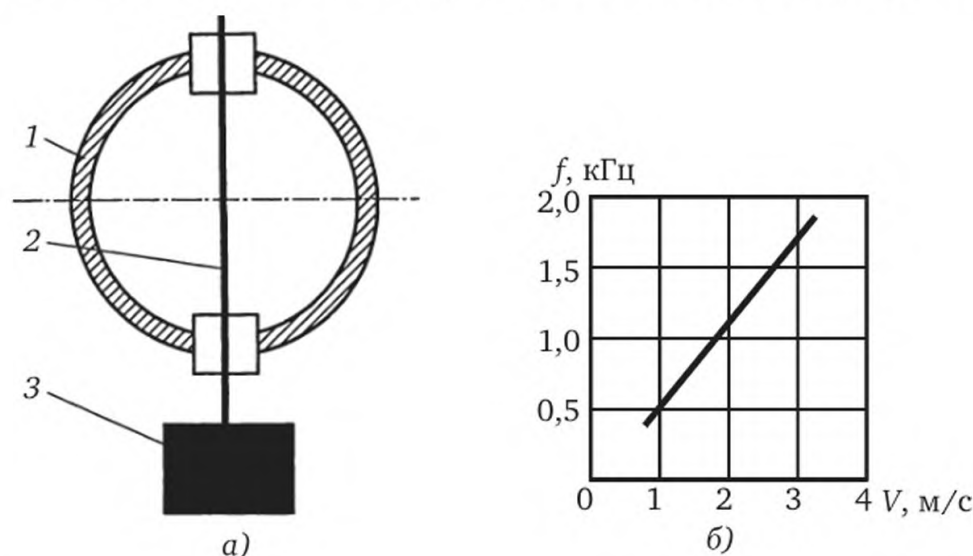


Рис. 5.17. Схема и статическая характеристика поперечного волоконно-оптического преобразователя

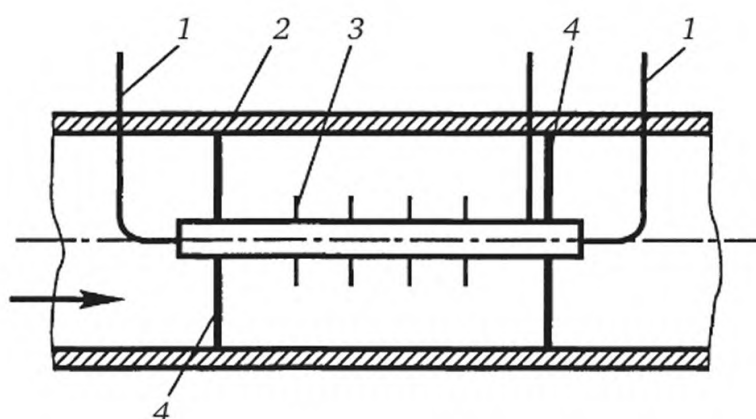


Рис. 5.18. Схема продольного волоконно-оптического расходомера

Общим недостатком двух названных способов оптического измерения скорости потока является то, что, будучи помещенными в поток жидкости, датчики вызывают возмущения этого потока. Подобных искажений удастся избежать, применяя бесконтактные методы измерений, основанные на использовании лазера (применяя так называемые лазерные анемометры).

Суть лазерных методов состоит в том, что луч лазера разделяется в полупрозрачном зеркале на два луча, которые фокусируются в одной точке в пределах прозрачного участка трубопровода. Пройдя через жидкость, рассеянный ею свет попадает на фотоумножитель, где преобразуется в напряжение, пропорциональное измеряемому расходу жидкости.

Электронно-оптические методы позволяют строить датчики, являющиеся индикатором вида жидкости. Идея построения таких датчиков

состоит в том, что индицируется переменный скачок показателя преломления на границе световода, что, естественно, зависит от вида жидкости, омывающей данный световод. Принципиальная схема такого датчика приведена на рис. 5.19.

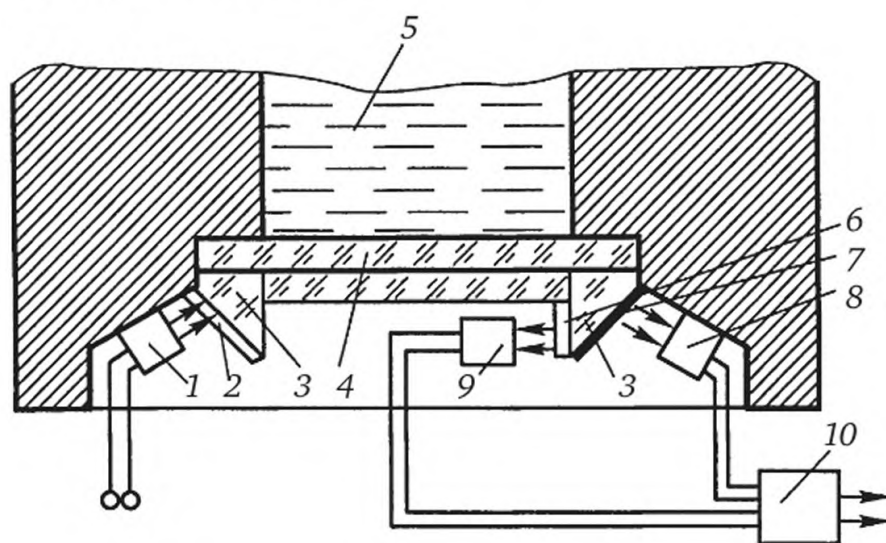


Рис. 5.19. Индикатор вида жидкости

Здесь поток излучения от источника 1 проходит через поляризатор 2 и входную призму 3, а затем поступает в плоский упругий световод 4 и движется по нему с помощью полных внутренних отражений от его параллельных внешних поверхностей. На выходной поверхности призмы вывода (также 3) с помощью установленного там полупрозрачного покрытия 7 поток излучения разделяется на два. Прошедшая через полупрозрачное покрытие часть потока попадает на фотоприемник 8, а часть потока, отразившаяся от покрытия 7, проходит анализатор 6 и достигает фотоприемника 9.

При наличии на внешней поверхности плоского световода 4 контролируемой жидкости 5 происходит его деформация под тяжестью этой контролируемой жидкости. Состояние поляризации зависит от массы контролируемого слоя жидкости над световодом и однозначно определяется ее плотностью. Анализатор 6 и второй фотоприемник 9 позволяют выделить сигнал, зависящий от показателя преломления контролируемой жидкости и от ее плотности. Вычислитель 10 позволяет сформировать и разделить два сигнала, которые соответствуют показателю преломления и плотности контролируемой жидкости.

На рис. 5.20 представлена схема световолоконного датчика относительных перемещений. Он состоит из коаксиального световода 1, а также подводящего 2 и отводящего 3 световодов. На конце подводящего световода 2 установлен светодиод-источник 4, а на конце отводящего световода 3 — фотодиод-приемник 5. Позицией 6 обозначен измеряемый объект, например обрабатываемая деталь.

Датчик, изображенный на рис. 5.20, работает следующим образом. От светодиода 4 излучение проходит через подводящий световод 2,

затем попадает в коаксиальный световод 1, отражается от поверхности детали 6, снова попадает в коаксиальный световод 1 и по отводящему световоду 3 поступает на фотодиод 5, где и регистрируется с помощью измерительной аппаратуры.

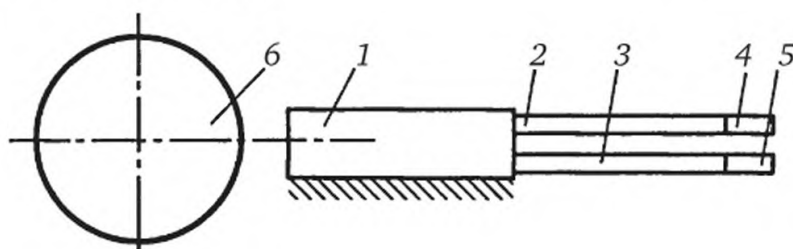


Рис. 5.20. Схема световолоконного датчика относительных перемещений

Такой датчик позволяет измерять шероховатость поверхности и относительные расстояния между рабочим торцом закрепленного коаксиального световода 1 и поверхностью 6.

На рис. 5.21 представлена схема датчика для контроля крутильных колебаний. Изображенный на рисунке датчик содержит корпус 1 в виде двух сообщающихся сосудов, частично заполненных инертной рабочей жидкостью 2, например ртутью. Сосуд 3 герметически закрыт, а в другом размещен коаксиальный световод 4, рабочая поверхность которого обращена в сторону инертного элемента 2. Стержень коаксиального световода 4 соединен подводящим световодом 5 с источником светового излучения (светодиодом) 6, а отводящий световод 7 связан с преобразователем 8 светового излучения в электрический сигнал (фотодиодом). Этот сигнал через усилитель 9 связан с измерительным устройством 10. Датчик устанавливается вертикально на исследуемом объекте 11. В свободных полостях сосудов 3 воздух откачан.

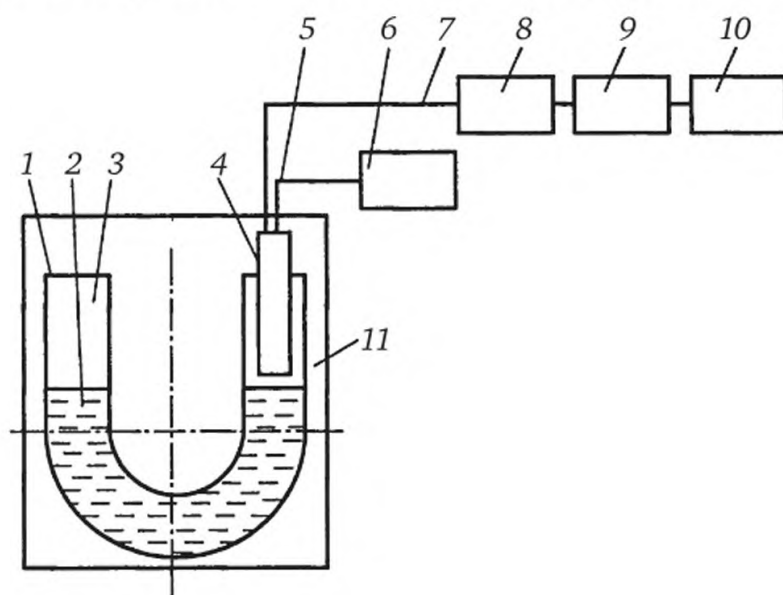


Рис. 5.21. Схема оптоэлектронного датчика для контроля крутильных колебаний

В исходном положении световое излучение от источника 6 поступает по световоду 5 в коаксиальный световод 4, отражается от внешней поверхности инертного элемента 2, снова попадает в коаксиальный световод 4, затем в преобразователе 8 превращается в электрический сигнал, регистрируемый устройством 10. При наличии крутильных колебаний изменяется величина зазора между рабочей поверхностью инертного элемента 2 и световодом 4, а следовательно, и величина рассеянного светового сигнала, которая регистрируется в измерительном устройстве 10.

Существует также множество принципиальных схем и конструкций оптоэлектронных датчиков для контроля вибраций резцов, возникающих в процессе обработки металлов, в том числе и на станках-автоматах.

Контрольные вопросы

1. Что сочетает в себе оптоэлектроника?
2. Что такое оптическое излучение?
3. Что такое ультрафиолетовое излучение?
4. На какие части делится ультрафиолетовое излучение?
5. Что такое видимое излучение?
6. На какие части делится видимое излучение?
7. Что такое инфракрасное излучение?
8. На какие части делится инфракрасное излучение?
9. Что такое показатель преломления?
10. Что такое показатель отражения?
11. Что такое показатель поглощения?
12. Что такое когерентные волны светового потока?
13. Какое отражение называется зеркальным?
14. Что такое радиометрия и каковы ее отличительные особенности?
15. Что такое фотометрия и каковы ее отличительные особенности?
16. Какое излучение называют монохроматическим?
17. Как возникает и измеряется дисперсия света?
18. Что является естественным источником светового излучения?
19. Каково пространственное распределение излучения у ламп накаливания?
20. Каков основной недостаток у ламп накаливания как у источников света?
21. Что собой представляют газоразрядные лампы?
22. Каков основной недостаток у газоразрядных ламп как у источников света?
23. Каков принцип работы лазера как источника света?
24. Каковы основные разновидности лазеров, применяющихся в качестве источников света?
25. Каковы основные режимы работы лазеров, применяющихся в качестве источников света?
26. Что в настоящее время является наиболее распространенным источником светового излучения для систем контроля и измерения?
27. Что делается для уменьшения потерь энергии на поверхности полупроводника, входящего в состав светодиода?
28. Какие эпитаксиальные структуры используются для получения светодиодов с различным свечением?
29. Как осуществляется омический контакт с компонентами светодиодов?

30. На какие группы принято разделять приемники светового излучения?
31. Как устроен тепловой приемник излучения?
32. Что такое внутренний и внешний фотоэффекты?
33. Что такое фотоумножитель, какой эффект положен в основу его работы?
34. Чем газонаполненные фотоэлементы отличаются от вакуумных, каковы их сравнительные характеристики?
35. Что собой представляют фоторезисторы?
36. Каковы основные конструктивные принципы оформления фоторезисторов?
37. Что такое фотодиод и фототранзистор?
38. Как устроен датчик механических колебаний, использующий фото- и светодиод?
39. Какое физическое явление лежит в основе построения оптических волокон связи?
40. Каковы преимущества волоконной оптики по сравнению с традиционными методами связи?
41. Каковы наиболее распространенные способы соединения оптических волокон?
42. Какие дефекты возможны при соединении оптических волокон?
43. Какие потери возможны в световодах при передаче оптического сигнала?
44. Что такое амплитудно-модулированный световой сигнал и почему он нашел преобладающее распространение в системах измерения?
45. На каком принципе основана работа датчика шероховатости?
46. Что такое оптический переключатель?
47. В каких режимах работает оптический переключатель, использующий механическую шторку?
48. Каковы эксплуатационные возможности оптического переключателя, использующего механическую шторку?
49. Как устроен высокочувствительный оптический датчик давления?
50. Как устроен и работает поперечный волоконно-оптический расходомер?
51. Как устроен и работает продольный волоконно-оптический расходомер?
52. Каков принцип работы бесконтактного оптического расходомера?
53. Как устроен и работает индикатор вида жидкости?
54. Как устроен и работает световолоконный датчик относительных перемещений?
55. Как устроен и работает оптоэлектронный датчик для контроля крутильных колебаний?
56. Применяются ли оптоэлектронные методы для контроля резцов в станках-автоматах?

Глава 6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

§ 6.1. Общие положения

Электромагнитные преобразователи представляют собой один или несколько контуров, по которым могут протекать электрические токи, находящиеся в магнитном поле. Это поле может быть создано как токами, протекающими в контуре, так и каким-либо внешним источником.

Электромагнитные преобразователи характеризуются такими параметрами, как величина и направление токов, протекающих через контур, потокосцепление и индуктивность. Выходной величиной для таких преобразователей могут быть индуктивность, электромагнитная сила и индуцируемая в контуре ЭДС. Индуктивность преобразователя зависит от числа его рабочих витков, поперечного сечения магнитного потока и магнитной проницаемости среды. Индуктивность увеличивается, если в магнитное поле контура ввести ферромагнитный материал.

Несколько схем электромагнитных преобразователей показано на рис. 6.1. На рис. 6.1, а представлена принципиальная схема индуктивного преобразователя с ферромагнитным сердечником. Индуктивность L зависит от положения сердечника, что и является входной величиной датчика. Преобразователи, выходная величина которых зависит от внешнего магнитного поля, называются *магнитомодуляционными*.

На рис. 6.1, б дана принципиальная схема *магнитоупругого* преобразователя. Под действием приложенной силы происходит деформация ферромагнитного сердечника, в результате чего изменяется его магнитная проницаемость. Такие преобразователи часто используются для измерения сил и давлений.

На рис. 6.1, в электромагнитная сила действует на контур с током (на катушки ротора), стремясь сместить или развернуть его так, чтобы суммарная индукция магнитного тока была максимальной. Эта электромагнитная сила пропорциональна току и индукции. Если используется постоянный магнит, то можно по углу поворота ротора измерять ток. Такие преобразователи называются *магнитоэлектрическими* и используются в измерительных системах электромеханических приборов.

На схеме рис. 6.1, г ферромагнитный сердечник втягивается в контур (катушку) с током таким образом, чтобы индуктивность контура была

минимальной. Сила втягивания при этом пропорциональна квадрату силы тока. Такие преобразователи используются в электромагнитных измерительных приборах.

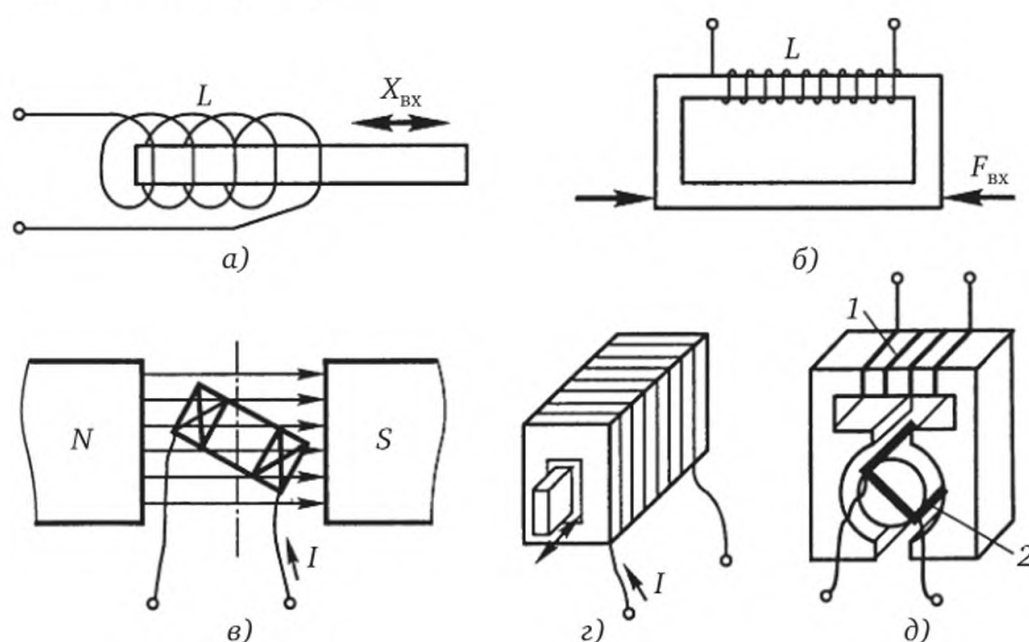


Рис. 6.1. Схемы электромагнитных преобразователей

На рис. 6.1, д показано, как применяют ферромагнитные магнитопроводы, чтобы усилить электромагнитное поле и сконцентрировать его в определенной области. Через обмотку 1 проходит переменный ток, а в рамке 2 наводится ЭДС, величина которой зависит от угла поворота этой рамки. Основными материалами для изготовления ферромагнитных сердечников служат при этом сплавы на основе железа, никеля и кобальта, а также порошковые материалы с наполнителями в виде пластмасс.

Области использования названных электромагнитных преобразователей весьма обширны. В зависимости от физических явлений, которые используются для их построения, они могут быть разделены на следующие группы:

- преобразователи тока и напряжения;
- электромеханические преобразователи электрического тока в электромагнитную силу (используются в ваттметрах, вольтметрах, амперметрах, фазометрах, частотомерах и др.);
- магнитоупругие преобразователи, в которых магнитная проницаемость ферромагнитных сердечников изменяется под действием механических напряжений (используются для измерения сил и давления);
- индукционные преобразователи, основанные на изменении электромагнитной индукции (используются для измерения скорости, а также постоянных и переменных магнитных полей);
- индуктивные преобразователи для измерения неэлектрических величин, влияющих на изменение положения тех или иных элементов преобразователей;

- магнитомодуляционные преобразователи, в которых используются нелинейные свойства магнитных цепей.

Стрелочные электроизмерительные приборы обычно строятся так, что входной величиной в них является ток, а выходной — перемещение стрелки индикатора. То, что входной величиной является ток, не исключает использования таких преобразователей и для измерения других электрических величин — напряжения, сопротивления и др. — путем соответствующего включения этих преобразователей в измерительные схемы.

Показательным устройством и работа амперметра с *электромагнитным* преобразователем. Он содержит неподвижную катушку и подвижный сердечник, жестко закрепленный на оси вращения, которая может поворачиваться в соответствующих подшипниках. С этой осью жестко связана стрелка, которая перемещается относительно отсчетной шкалы. На концах этой шкалы устанавливаются упоры, ограничивающие перемещение стрелки. При включении электромагнитного преобразователя в электрическую цепь по неподвижной катушке протекает ток, который создает магнитное поле, втягивающее сердечник внутрь этой катушки. При этом создается крутящий момент на оси стрелки индикатора. Поворот стрелки пропорционален этому крутящему моменту, поскольку она связана с закручиваемой пружиной. Внутренний конец пружины жестко закреплен на оси вращения, наружный — закреплен на неподвижной части преобразователя.

Подвижная часть такого преобразователя представляет собой динамическую систему, которая может совершать колебания относительно положения равновесия. Для того чтобы ускорить затухание подобных колебаний, применяются специальные успокоители. Успокоители обычно представляют собой связанные со стрелкой лопасти, которые перегоняют воздух в специальной камере из одной полости в другую. Для уравнивания на стрелке помещают регулируемые противовесы в виде стержней с резьбой, по которой могут перемещаться регулирующие гайки. Подобные приборы также снабжаются устройствами для установки в нулевое положение. Это устройство обычно представляет собой регулируемый с помощью специального винта поводок, к которому прикрепляется наружный конец закручиваемой пружины. Все это имеет целью повышение точности и чувствительности электромагнитного прибора.

Электроизмерительные приборы могут строиться также по электродинамическому и магнитоэлектрическому принципу. Как в электродинамическом, так и в магнитоэлектрическом приборах чувствительным элементом подвижной части является рамка, состоящая из тонкого провода, способная вращаться в магнитном поле.

В *магнитоэлектрическом* приборе, как уже говорилось, магнитное поле создается постоянным магнитом. Подвижная часть магнитоэлектрического прибора укрепляется на двух растяжках, которые одновременно выполняют различные функции, заменяя пружину и ось. В маг-

нитоэлектрических приборах успокоителем служит каркас рамки, и, кроме того, успокоителем колебаний служит сама обмотка, когда она включается в измерительную цепь с конечным сопротивлением.

В электродинамическом приборе для создания магнитного поля используется неподвижная катушка.

Сопоставив рассмотренные принципы построения электроизмерительных приборов, можно прийти к следующим выводам.

Электромагнитный измерительный механизм, подобный рассмотренному, имеет высокую надежность и технологичен в изготовлении. В его конструкции отсутствуют токоведущие элементы в подвижной части, что исключает необходимость обеспечения надежного токоподвода к ним. Для защиты такого механизма от внешних магнитных полей он помещается в экранированный корпус.

Электродинамический измерительный механизм обладает сравнительно небольшим полезным вращающим моментом, и поэтому на него существенное влияние оказывают моменты сопротивления. Для защиты от внешних полей этот механизм защищают специальным экраном. Устройство такого типа характеризуется большими габаритами и потребляет значительную мощность. Оно используется главным образом в лабораторных приборах переменного тока.

Магнитоэлектрический измерительный механизм обладает большим полезным моментом. Он не реагирует на внешние магнитные поля. Не требуется создавать успокоитель в виде отдельного элемента конструкции. Измерительный механизм такого типа обладает высокой точностью и имеет линейную зависимость между углом поворота и измеряемым током.

В настоящее время стремятся во всех электромеханических измерительных приборах использовать один тип механизма, а именно — магнитоэлектрический с преобразованием измеряемой величины в постоянный ток.

§ 6.2. Индуктивные преобразователи

Принцип действия *индуктивных* преобразователей состоит в изменении их индуктивности при перемещении того или иного элемента их конструкции. В простейшем случае индуктивный преобразователь состоит из П- или Ш-образного сердечника с катушкой, питаемой переменным током, и из ферромагнитного якоря. Частота напряжения питания должна быть существенно больше частоты изменения измеряемого параметра. В качестве якоря может быть использован и сам измеряемый объект, если он выполнен из ферромагнитного материала. Между торцами сердечника и якорем устанавливается начальный зазор δ_0 , который изменяется при перемещении ферромагнитного якоря. При этом изменяется и магнитный поток, проходящий через катушку, намотанную на сердечнике.

Изменение воздушного зазора δ_0 приводит к изменению индуктивности α_0 в соответствии с выражением:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + C\delta(t),$$

где $\alpha(t)$ и $\delta(t)$ — значения индуктивности и величины зазора соответственно; C — константа, зависящая от конструкции конкретной измерительной системы.

В промышленности применяют индуктивные преобразователи с *переменной величиной зазора* (для измерения перемещений от долей микрона до нескольких миллиметров), с *переменной площадью зазора* (для измерения перемещений до 15...20 мм) и с *подвижным цилиндрическим сердечником* (индуктивные преобразователи соленоидного типа для измерения перемещений до 2000 мм).

Существуют также индуктивные преобразователи *трансформаторного* типа. Такие преобразователи представляют собой устройства, в которых входное перемещение изменяет величину индуктивной связи между двумя системами обмоток, из которых одна питается базовым переменным током, а с другой снимается выходной сигнал.

На рис. 6.2 показаны различные принципиальные схемы индуктивных преобразователей.

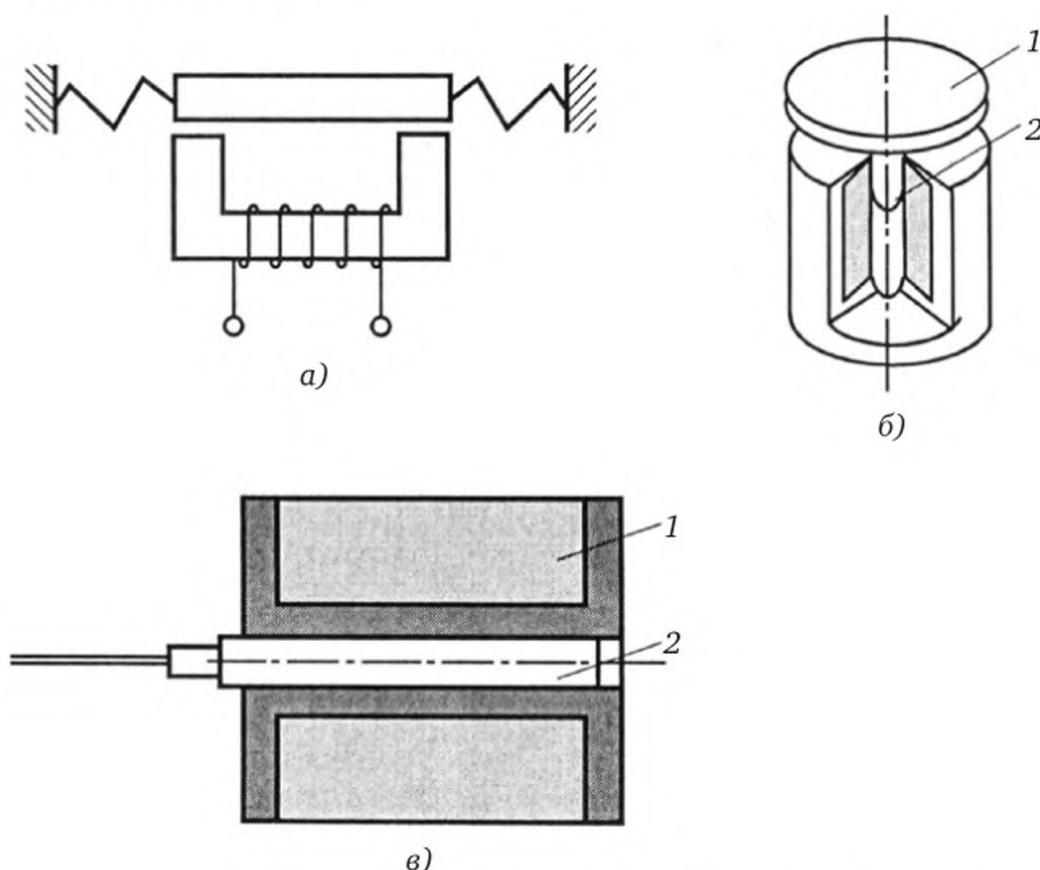


Рис. 6.2. Принципиальная схема индуктивных преобразователей

На рис. 6.2, а изображен индуктивный преобразователь с малым воздушным зазором между сердечником катушки и подпружиненной

эластичной ферромагнитной мембраной. Этот зазор может изменяться под действием силы (или давления), приложенной к эластичной мембране. Такой преобразователь нашел широкое применение для измерения деформаций и усилий.

На рис. 6.2, б изображен индуктивный преобразователь, состоящий из ферритового элемента 1 и имеющий ферритовый сердечник 2, для изготовления которого используется основание этого ферритового элемента.

На рис. 6.2, в изображен индуктивный преобразователь с разомкнутой магнитной цепью. Этот преобразователь представляет собой катушку 1, в центральном отверстии которой размещается сердечник — стальной стержень 2. Под воздействием измеряемого параметра происходит перемещение сердечника относительно катушки, в результате чего ее индуктивность изменяется.

Положительным качеством индуктивных преобразователей является то, что они имеют большой по мощности сигнал на выходе и могут использоваться без усилителя. Индуктивные преобразователи широко используются в устройствах активного контроля размеров обрабатываемой детали, особенно при чистовых методах обработки.

На рис. 6.3 представлена принципиальная схема индуктивного датчика размера. На этом рисунке щуп с наконечником 2 опирается на шток 1 измерительного устройства. Перемещение штока 1 влечет за собой соответствующее перемещение якоря 4 между катушками 3 и 5, которые включены в измерительный мост. Когда якорь 4 смещается из своего нейтрального положения, то комплексное сопротивление катушек 3 и 5 изменяется и в измерительной диагонали AB моста появляется ток, который измеряется электрочувствительным прибором 6. По величине отклонения стрелки прибора 6 можно определить отклонение размера обрабатываемой детали.

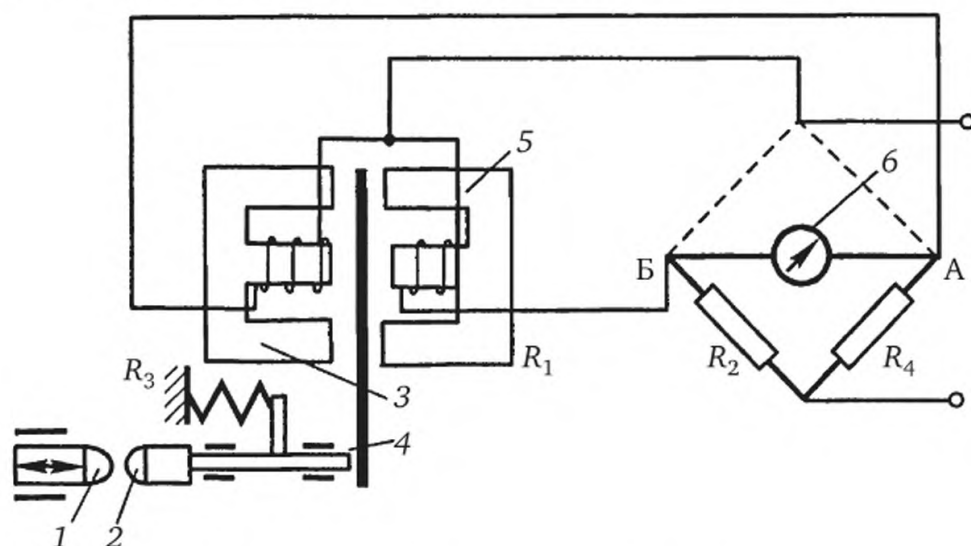


Рис. 6.3. Схема индуктивного датчика размера

В практике механообработки находит достаточно широкое применение контроль обрабатываемых деталей в процессе их шлифования.

Для этой цели обычно применяют трехконтактную измерительную скобу. В таком датчике также происходит балансировка и разбалансировка измерительного моста переменного тока, плечи которого образованы катушками индуктивного датчика, подобного рассмотренному, и обмотками трансформатора со средней точкой. Выходной сигнал с диагонали моста преобразуется в блоке управления и поступает одновременно к показывающему прибору и в систему управления станком. На нижней части корпуса всего прибора устанавливается сменная скоба с нижним и боковым наконечниками. С верхней частью измерительного штока связан якорь индуктивного датчика, расположенный между измерительными катушками. Перемещение штока и якоря ограничивается регулируемыми упорами.

Настройка датчика осуществляется по эталонной детали. Для этого измерительная скоба надевается на эталонную деталь, занимая свое рабочее положение, и с помощью микрометрического винта магнитопроводы перемещаются относительно якоря до тех пор, пока стрелка электрочувствительного прибора не займет нулевое положение.

В начале обработки, когда контролируемый размер максимален, измерительный шток и якорь индуктивного датчика находятся в крайнем положении. После окончания предварительного шлифования якорь индуктивного устройства занимает определенное положение, которому соответствуют заранее заданные значения индуктивностей катушек, включенных в плечи измерительного моста. Это фиксируется электросхемой, и станок переключается с черновых режимов шлифования на чистовые. При достижении окончательного заданного размера детали измерительный мост уравнивается, зажигается сигнальный транспарант на индикаторном устройстве и станок останавливается.

При шлифовании нескольких ступеней вала с одной установки необходимо контролировать размеры разных диаметров в нескольких сечениях. Для этого используют трехконтактный измерительный прибор, аналогичный описанному, но с быстросменными измерительными скобами.

Измерительные приборы с индуктивными преобразователями часто используются для контроля прерывистых поверхностей, таких как шлицевые валы и втулки, валы со шпоночными пазами и др. Для предохранения измерительных наконечников от повреждений при их прохождении над местом, где эта поверхность прерывается, при их приближении к этой поверхности автоматически включается электромагнит, который затормаживает эти наконечники. Этот электромагнит автоматически отключается, когда измерительные наконечники снова оказываются над гладкой поверхностью. Прибор в процессе работы подает сигналы в систему управления станком на переход с предварительного на чистовое шлифование, на правку круга, на прекращение подачи и переход на выхаживание, на отвод шлифовального круга и останов станка, после того как заданный размер получен. Если прибор отключен, изме-

рительные наконечники также автоматически отводятся от контролируемой поверхности, что предохраняет их от случайного повреждения. Отвод всего измерительного прибора и его подвод на рабочую позицию к контролируемой детали осуществляются пневмоцилиндром.

Индуктивные преобразователи также используются в механообработке для построения так называемых *виброгенераторных датчиков*. Схема подобного прибора приведена на рис. 6.4.

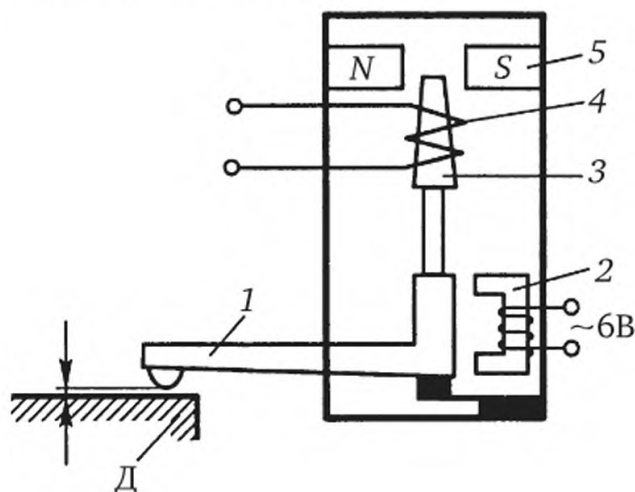


Рис. 6.4. Схема виброгенераторного датчика

На этом рисунке на конце щупа 1 закреплен измерительный наконечник, который с помощью электромагнита 2 совершает 100 колебаний в секунду. На верхнем конце щупа 1 закреплен якорь 3, расположенный между полюсами постоянного магнита 5. Начальная полярность магнита 5 не имеет значения. При колебании якоря 3 в катушке 4 индуцируется электрический ток, сила которого зависит от амплитуды колебаний. Когда измерительный наконечник со щупом подводится к обрабатываемой поверхности, то размах этих колебаний ограничивается. При изменении положения контролируемой поверхности в результате производимой обработки амплитуда этих колебаний будет возрастать. По величине силы тока, генерируемого в обмотке 4, можно судить о положении обрабатываемой поверхности.

Виброгенераторные датчики данного вида часто применяются в механообработке взамен контактных датчиков, описанных ранее. Применительно к механообработке контактные датчики имеют следующие недостатки:

- при попадании под измерительный наконечник стружки или абразивной пыли точность измерения резко снижается;
- на точность измеряемых размеров оказывает влияние шероховатость поверхности детали;
- преобразователи контактного типа имеют длинную и подверженную помехам связь передачи информации до ее использования.

В отличие от контактных датчиков виброгенераторные датчики обладают рядом положительных свойств:

- измерительный наконечник касается детали только очень короткое время, и его износ практически отсутствует, что дает возможность контролировать размеры компонентов, обладающих высокими окружными скоростями, например создается возможность контроля профиля и размеров вращающегося абразивного круга;
- передаточное отношение от датчика к регистрирующему прибору или к исполнительному механизму может быть задано в достаточно широких пределах;
- в процессе подвода щупа к обрабатываемой детали исключается опасность повреждения измерительного наконечника;
- прибор выдает усредненный результат измерений.

Прибор такого типа является достаточно компактным и удобным для использования. Он широко применяется для автоматического контроля на кругло- и внутришлифовальных станках, при тонком точении и при хонинговании.

Часто применяются также *виброконтактные* датчики, у которых отсутствует специальный магнитоэлектрический генератор (см. рис. 6.4, поз. 4).

Подобный датчик изображен на рис. 6.5. Измерительный щуп 1 установлен на рычаге 3, который приводится в колебательное движение электромагнитом 2, питающимся переменным током. На другом конце этого рычага устанавливается контакт K_2 , который при максимальном отклонении замыкается с неподвижным контактом K_1 . В результате происходит замыкание цепи управления. Иногда применяется несколько другая конструктивная схема, когда прямой вибратор устанавливается на плоскопараллельных пружинах. Такие преобразователи используются при чистовой обработке на плоскошлифовальных и бесцентровошлифовальных станках, а также на хонинговальных станках.

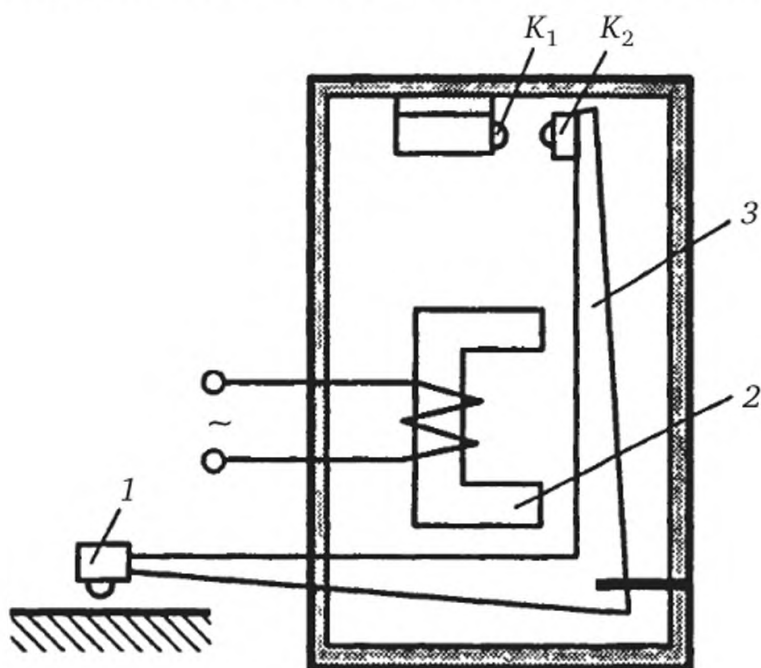


Рис. 6.5. Схема виброконтактного датчика

§ 6.3. Вихретоковые и магнитоупругие преобразователи

Принцип действия *вихретоковых* преобразователей заключается в изменении индуктивности и взаимоиндуктивности катушек при приближении к ним проводящего тела. Следует учесть, что кроме контролируемого зазора на интенсивность и характер распределения вихревых токов, возбуждаемых на поверхности объекта, существенное влияние оказывают толщина токопроводящего слоя, магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость материала подводимого проводящего тела.

Существует три типа вихретоковых преобразователей, которые изображены на рис. 6.6. Это *накладные* (рис. 6.6, а), *экранные* (рис. 6.6, б) и *щелевые* (рис. 6.6, в) преобразователи. Во всех случаях вихретоковый преобразователь состоит из катушки, магнитное поле которой искажается при приближении проводящей пластины или проводящего покрытия. При этом индуктивное сопротивление катушки уменьшается, а ее активное сопротивление несколько увеличивается (за счет потерь в проводящей среде).

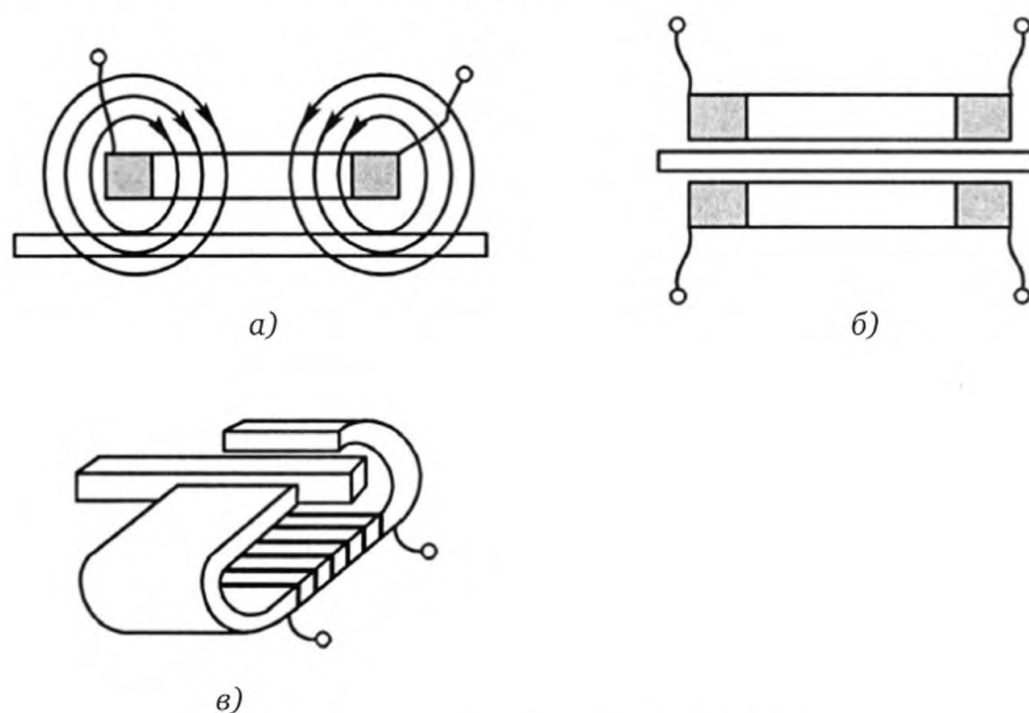


Рис. 6.6. Вихретоковые преобразователи

Подобные преобразователи используются для контроля линейных размеров и толщины тонких пластин и покрытий, а также для обнаружения внутренних дефектов и всякого рода трещин, отслоений, царапин и раковин.

Вихретоковые преобразователи используются также для измерения вибраций, для определения частоты, амплитуды и форм вибрации при динамических испытаниях различных изделий машиностроения. Обычно измеряемые амплитуды лежат в пределах 1...2000 мкм при

частотах 20...20 000 Гц. Этот же принцип используется для контроля вращающихся валов.

Стабильность работы вихретоковых преобразователей определяется стабильностью частоты сигнала задающего генератора и постоянством параметров катушек индуктивности и конденсаторов. Поэтому стремятся применять схемы генераторов, стабилизированных по частоте, изготавливают дифференциальные преобразователи без ферритовых сердечников, выбирают элементы резонансных контуров с оптимальными температурными коэффициентами индуктивности, емкости и частоты. Используются схемы с термокомпенсацией. Применяя вихретоковые преобразователи, следует учитывать, что они чувствительны к внешним электромагнитным полям.

Для вихретоковых преобразователей характерны относительно низкая чувствительность и наличие погрешностей, обусловленных изменениями электрических свойств проводящего тела. Однако эти преобразователи все же нашли свое применение в схемах активного контроля в машиностроении, поскольку они могут успешно работать в загрязненных и агрессивных средах, при воздействии различных смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и при высоких скоростях подачи инструмента и обрабатываемых изделий.

Для построения датчиков неэлектрических величин в машиностроении также используется физическое явление изменения магнитной проницаемости ферромагнитных тел под действием приложенной к ним механической нагрузки (растяжение, сжатие, изгиб, кручение). На этом основано построение так называемых *магнитоупругих* преобразователей.

Обратным по отношению к магнитной упругости является эффект *магнитострикции*, заключающийся в возникновении механических деформаций и напряжений в ферромагнитном материале при изменении в нем напряженности магнитного поля.

Магнитоупругие материалы характеризуются относительной упругой чувствительностью S_μ , которая равна

$$S_\mu = (\Delta/\mu)/\delta,$$

где Δ/μ — относительное приращение магнитной проницаемости; δ — механическое напряжение в ферромагнитном материале, вызвавшее данное приращение магнитной проницаемости.

Все магнитоупругие преобразователи делятся на две группы.

К первой группе относятся преобразователи, в которых измеряется магнитная проницаемость чувствительного элемента в одном направлении. В таких преобразователях магнитный поток большей частью направляется вдоль линии действия измеряемого усилия. Это приводит к изменению индуктивности соответствующей катушки, что показано на рис. 6.7, а, или к изменению взаимной индуктивности двух соответствующих катушек, что показано на рис. 6.7, б.

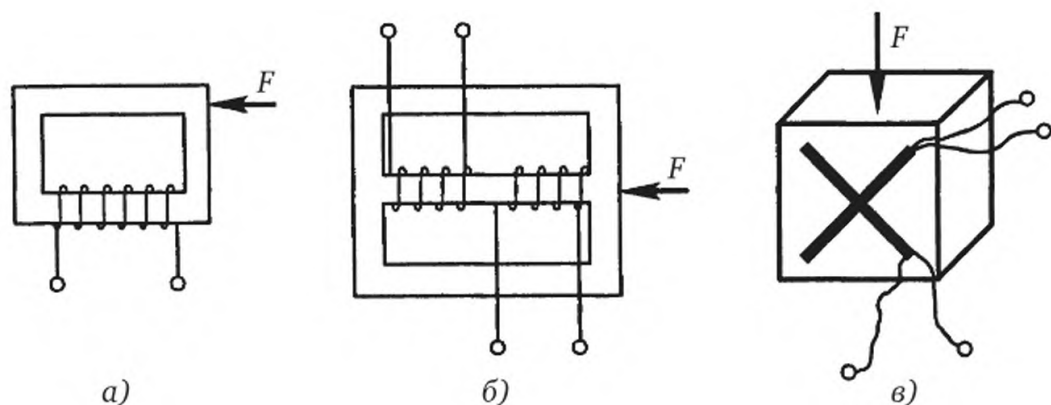


Рис. 6.7. Схема магнитоупругих преобразователей

В преобразователях второй группы измеряется изменение магнитной проницаемости, происходящее сразу в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В таких преобразователях магнитный поток направлен под углом 45° к линии действия измеряемого усилия. Это показано на рис. 6.7, в.

На рис. 6.8 показана схема магнитоупругого преобразователя, корпус 1 которого выполнен за одно целое с сердечником 2. На этом сердечнике с возможностью вращения вокруг него установлена катушка 4. Эта катушка выполняется разрезной, состоящей, по меньшей мере, из двух половинок. На катушке 4 намотана обмотка 3. Преобразователь изготавливают следующим образом. В цельном куске металла делают (например, методом электроискрового копирования) полость с образованием цилиндрического сердечника 2. На этот сердечник надевают две половинки катушки 4 и соединяют их на месте, например, клеем. На катушку 4 наматывают одну или две обмотки 3 путем вращения катушки 4 относительно сердечника 2. Такой преобразователь может иметь много витков и при малых размерах способен выдать большой по мощности выходной сигнал.

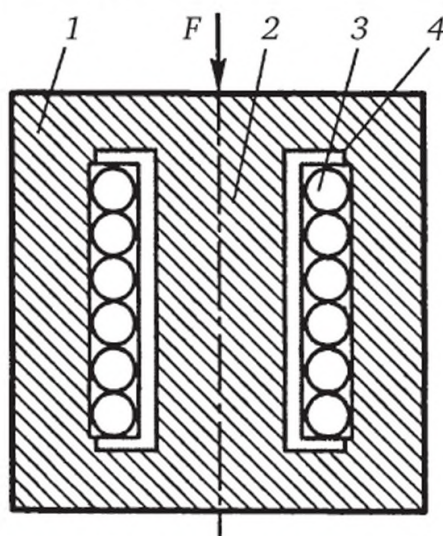


Рис. 6.8. Конструктивная схема цельного магнитоупругого преобразователя

Магнитоупругие свойства проявляются и при скручивании ферромагнитных тел. При пропускании тока через стержень, на который действует крутящий момент, в нем, кроме кругового магнитного потока, возникает и продольный магнитный поток, который наводит в обмотке, намотанной на стержень, ЭДС, пропорциональную этому крутящему моменту. Эта схема приведена на рис. 6.9.

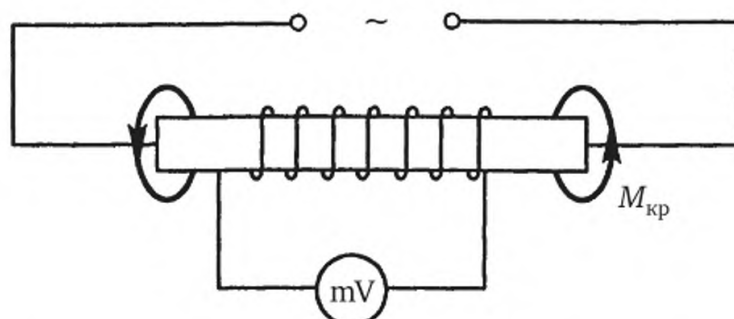


Рис. 6.9. Схема магнитоупругого преобразователя крутящего момента

Магнитоупругие преобразователи используются для измерения сил, давлений, крутящих моментов. Они развивают достаточную мощность и могут быть включены в последующую цепь без промежуточного усиления сигнала. Такие преобразователи обладают высокой надежностью, так как не содержат подвижных частей и могут измерять как статические, так и динамические нагрузки.

Здесь же следует рассмотреть так называемые датчики Виганда, которые представляют собой преобразователи магнитного поля. Такой преобразователь обычно представляет собой катушку длиной около 15 м с количеством витков порядка 1300, намотанную из проволоки диаметром 0,3 мм из сплава «Викалой» (10 % ванадия, 52 % кобальта и 38 % железа). Если расположить такую катушку в магнитном поле, то при изменении знака намагничивания (направления магнитного поля) в катушке возникает электрический импульс длительностью около 20 мс при напряжении около 2,5 В. Такие датчики применяют, например, для индикации положения зубьев зубчатых колес. Датчики Виганда работают в диапазоне температур от -196°C до $+175^{\circ}\text{C}$, не требуют внешнего источника питания, создают выходной сигнал порядка нескольких вольт и электробезопасны.

§ 6.4. Вращающиеся трансформаторы и резольверы, линейные и круговые индуктосины

Для построения систем числового программного управления станками (систем ЧПУ), которые преобладают в большинстве технологических процессов в механообработке, существенным является получение данных об истинном положении рабочих органов станка. Числовое программное управление координатными перемещениями с дости-

жением при этом необходимой точности обеспечивается благодаря соответствующим устройствам обратной связи по положению, объединяемых общим названием «системы дистанционного отсчета». Такие системы могут использовать и датчики абсолютного отсчета, и циклические датчики.

Для абсолютного отсчета в основном используются круговые кодовые датчики положения. Применяемые при этом принципы построения кодовых масок более подробно будут рассмотрены в дальнейшем. Системы же, выдающие информацию по одному каналу в виде серии импульсов, число которых пропорционально величине перемещения (это называется *унитарным кодом*), применяют главным образом циклические датчики.

Среди аналоговых датчиков, используемых как для абсолютного, так и для циклического отсчета, наиболее распространены *фазовые* датчики положения. Устройством, служащим для преобразования угла поворота одной катушки по отношению к другой в сдвиг фазы одного переменного синусоидального напряжения по отношению к фазе другого переменного синусоидального напряжения такой же частоты, является так называемый *вращающийся трансформатор*.

Вращающийся трансформатор представляет собой индукционную микромашину по типу двухфазного асинхронного двигателя с фазным ротором. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор называется также *резольвером*. В нем на статоре и на роторе имеется по две одинаковые обмотки, конструктивно расположенные взаимно перпендикулярно. На пару статорных обмоток подаются два одинаковых синусоидальных опорных напряжения, сдвинутых по фазе на 90° . Иными словами, если одно из этих напряжений изменяется во времени по закону синуса, то другое изменяется во времени с той же частотой по закону косинуса. Такой сдвиг фаз можно получить, например, подавая второе из двух переменных гармонических напряжений через электрическую емкость. В результате взаимодействия векторов напряженности магнитных полей обеих статорных обмоток возникает вращающееся магнитное поле, т. е. поле, напряженность которого представляет собой вектор, постоянный по модулю, но вращающийся относительно центра статора с угловой частотой, равной частоте опорного переменного тока. В обмотках ротора тогда индуцируется ЭДС такой же частоты, но сдвинутая по фазе относительно опорного напряжения на величину, определяемую углом поворота ротора относительно статора.

Характерным примером аналогового фазового датчика, применяемого в станках с числовым программным управлением, может служить круговой (обычно пятидекадный) абсолютный датчик положения с измеряемым перемещением до 10 000 мм. В таком датчике с помощью измерительной зубчато-реечной пары приводятся во вращение так называемые *бесконтактные сельсины*. Между сельсинами соседних десятичных разрядов устанавливаются точные редукторы с передаточным отношением 10. Более точным, без дополнительных кине-

матических погрешностей, возникающих в зубчатой реечной передаче, является измерение положения рабочего органа станка с помощью бесконтактных линейных сельсинов. Пример такого сельсина показан на рис. 6.10. Этот сельсин состоит из рейки P и измерительной головки Γ , устанавливаемых соответственно на неподвижном и перемещаемом узлах станка. Рейка выполняется из стали и имеет зубцы прямоугольного профиля с шагом S_p . Измерительная головка представляет собой участок аналогичной рейки с зубьями такого же прямоугольного профиля, шаг которых отличается от $3S_p$ на $1/6$ (на половину одной фазы питающего трехфазного напряжения).

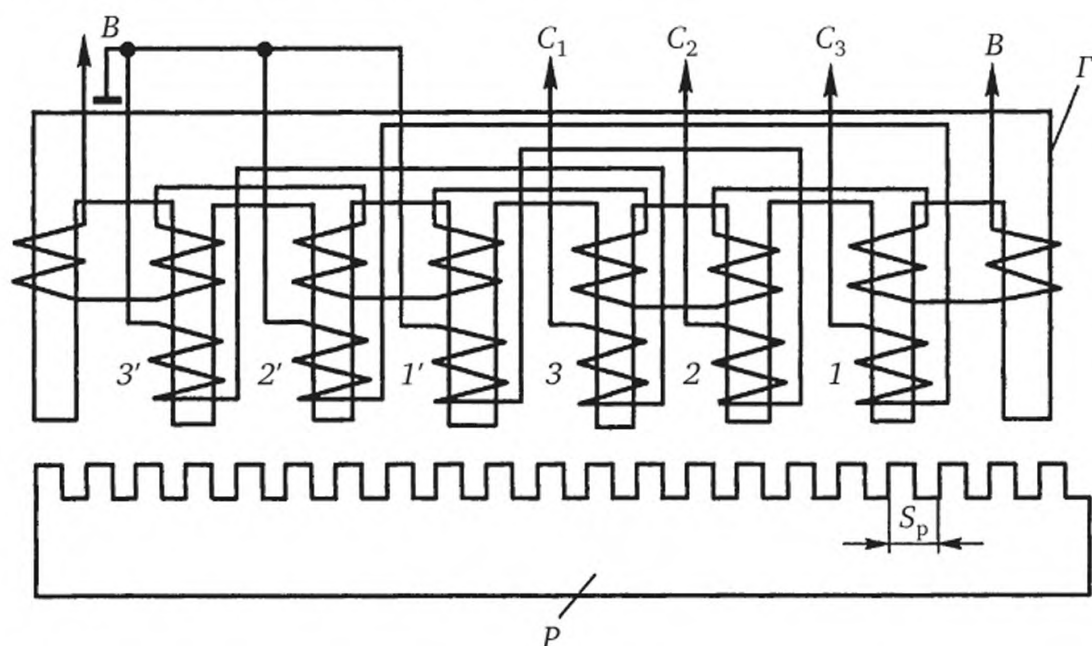


Рис. 6.10. Схема бесконтактного линейного сельсина

На измерительной головке Γ имеется трехфазная обмотка, соединенная по схеме «звезда» ($C_1 \rightarrow 1 - 1'$; $C_2 \rightarrow 2 - 2'$; $C_3 \rightarrow 3 - 3'$). Каждая фаза охватывает третий по счету зубец. Кроме того, на зубцах головки имеется однофазная обмотка B , намотанная таким образом, что ее направления на соседних зубцах противоположны. Размеры окна, толщина зубца и зазор между зубцами рейки и головки таковы, что при перемещении головки относительно рейки магнитная проводимость каждого из ее зубцов меняется по закону, приближающемуся к синусоидальному.

При подаче на обмотку B синусоидального напряжения с амплитудой и перемещении головки на величину X в фазах C_1 , C_2 и C_3 индуцируются гармонические ЭДС, амплитуды которых изменяются по косинусоидальному закону, а именно:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{\text{макс}} \cos[2\pi(X/S_p)]; \\ E_2 &= E_{\text{макс}} \cos[2\pi(X/S_p) + 2\pi/3]; \\ E_3 &= E_{\text{макс}} \cos[2\pi(X/S_p) - 2\pi/3]. \end{aligned}$$

Фаза этих напряжений изменяется на 180° при переходе головки через нулевое положение. Режим работы сельсина, при котором выходом является трехфазная обмотка, называется *трансформаторным*.

При подаче опорного трехфазного напряжения в трехфазную обмотку головки образуется бегущее магнитное поле, а в однофазной обмотке головки индуцируется ЭДС, фаза которой по отношению к опорному напряжению изменяется пропорционально перемещению X :

$$\varphi = 2\pi(X/S_p).$$

Режим работы сельсина, при котором выходом является его однофазная обмотка, называется режимом *фазовращателя*.

Другим распространенным типом датчиков, используемых для измерения программируемых координатных перемещений в станках с ЧПУ, являются так называемые линейные и круговые *индуктосины*.

Линейный индуктосин состоит из двух шкал, одна из которых устанавливается на подвижном, а другая на неподвижном узлах станка. Шкалы представляют собой пластины из электроизоляционного материала (обычно гетинакса или текстолита), на которые фотопечатным способом нанесены обмотки прямоугольной формы, как показано на рис. 6.11. На одной из шкал имеется одна обмотка 1 с шагом S , а на другой размещаются две расположенные навстречу друг другу обмотки 2 и 3 с тем же шагом S , но сдвинутые друг по отношению к другу на величину $S/4$. При подаче на обмотки 2 и 3 синусоидальных напряжений, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90° , образуется бегущее магнитное поле, и в обмотке 1 индуцируется ЭДС, фаза φ которой оказывается пропорциональной перемещению X шкалы:

$$\varphi = 2\pi(X/S).$$

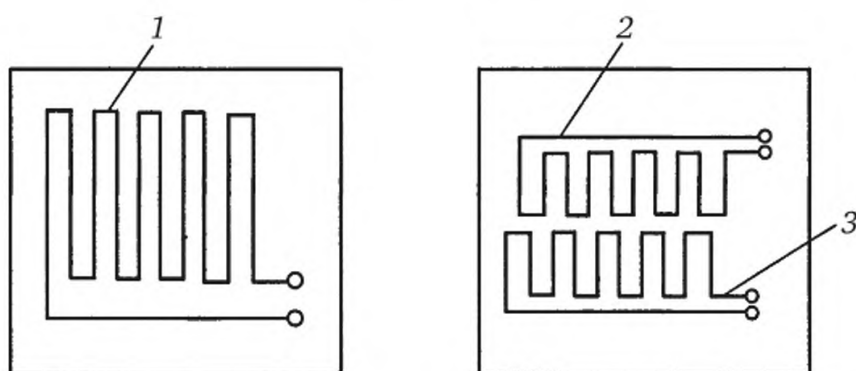


Рис. 6.11. Схема линейного индуктосина

Отдельным видом систем дистанционного отсчета являются устройства цифровой индикации (УЦИ). Как правило, они шестиразрядные и базируются на циклических (фазовых) датчиках положения. По способам формирования показаний младшего разряда эти устройства аналогичны рассмотренным выше. Различие состоит в способах фор-

мирования показаний старших разрядов. В младших разрядах обычно используют датчики типа сельсинов, в том числе и резольверы. Принцип работы подобного УЦИ состоит в следующем. Измеряется разность фаз между опорным сигналом (напряжением) и выходным сигналом датчиков младших разрядов. Затем интервал времени, соответствующий этой разности, преобразуется в соответствующую дискретную величину (производится так называемая операция квантования). Эта дискретная величина имеет вид числа, изображенного тем или иным кодом, который записывается в один или два младших разряда УЦИ. После этого формируются показания старших разрядов УЦИ. Это делается путем подсчета (с помощью реверсивных счетчиков) числа совпадений фаз опорного сигнала и выходного сигнала датчика. Обычно такое совпадение происходит через каждый миллиметр перемещения узла станка, тогда как доли миллиметра регистрируются в младших разрядах УЦИ.

Основными компонентами УЦИ являются:

- *блок опорного сигнала*, генерирующий сигналы прямоугольной формы с рядом фиксированных частот; из этих сигналов формируется трехфазное напряжение для управления сельсином, а также для управления вводом и выводом информации;
- *блок согласования*, осуществляющий квантование непрерывно изменяющейся разности фаз на выходе датчика, т. е. преобразование непрерывно изменяющегося сигнала в электрическое напряжение, изменяющееся скачкообразно;
- *блок формирования*, осуществляющий формирование базы отсчета (т. е. начального значения показаний) и импульсов отсчета целых шагов (миллиметров), выдачу этих импульсов на блок реверсивных счетчиков старших разрядов УЦИ и определение знака направления перемещений узла станка, а также выполняющий и некоторые другие функции.

Устройства подобного типа используются как автономно для цифровой индикации положения рабочих органов на станках с ручным управлением, так и для управления приводами в режиме позиционирования на станках с ЧПУ. На основе этих же принципов с использованием линейных либо круговых датчиков обратной связи создают следящие электроприводы с цифровым управлением.

Контрольные вопросы

1. Какие преобразователи относятся к электромагнитным?
2. Какие величины могут преобразовываться электромагнитными датчиками?
3. Что такое магнитомодуляционные преобразователи?
4. Что такое магнитоупругий преобразователь?
5. Что такое магнитоэлектрический преобразователь?
6. Какие преобразователи используются в электромагнитных измерительных приборах?
7. Какие материалы используются для ферромагнитных магнитопроводов в электромагнитных датчиках?

8. Как устроены и работают электромагнитные механизмы электрочувствительных приборов?
9. Как устроены и работают магнитоэлектрические механизмы электрочувствительных приборов?
10. Как устроены и работают электродинамические механизмы электрочувствительных приборов?
11. В чем состоит принцип действия индуктивных преобразователей?
12. Как устроены и работают индуктивные преобразователи с малым воздушным зазором?
13. Как устроены и работают индуктивные преобразователи, состоящие из ферритового элемента и сердечника, для которого используется сам этот ферритовый элемент?
14. Как устроены и работают индуктивные преобразователи с разомкнутой магнитной цепью, представляющие собой катушку с подвижным сердечником?
15. Как индуктивные преобразователи используются в системах активного контроля?
16. Как с помощью индуктивных преобразователей осуществляется активный контроль прерывистых поверхностей?
17. Для чего используется индуктивный преобразователь с быстросменными скобами?
18. Как устроены и для чего используются виброгенераторные индуктивные датчики?
19. Как устроены и для чего используются виброконтактные индуктивные датчики?
20. Каковы основные достоинства виброконтактных индуктивных датчиков?
21. На каких основных принципах базируется магнитоупругий преобразователь?
22. Какие существуют разновидности магнитоупругих преобразователей?
23. Как магнитоупругие преобразователи используются для измерения крутящего момента?
24. Что такое вихретоковые преобразователи?
25. Какие существуют принципиальные схемы вихретоковых преобразователей?
26. Что такое преобразователи Виганда?
27. Как устроены и для чего применяются преобразователи Виганда?
28. Что такое вращающийся трансформатор?
29. Какая разновидность вращающегося трансформатора называется резольвером?
30. Что такое линейный и круговой резольвер?
31. Что называется индуктосином?
32. Что такое линейный и круговой индуктосин?
33. Как устроен и работает линейный бесконтактный сельсин?
34. Что является выходной величиной при работе бесконтактного сельсина в трансформаторном режиме?
35. Что является выходной величиной при работе бесконтактного сельсина в режиме фазовращателя?
36. Что такое устройство цифровой индикации?
37. Из каких основных блоков состоит устройство цифровой индикации?
38. Каковы области применения устройств цифровой индикации?

Раздел II
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
ИНФОРМАЦИИ
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
МЕХАНООБРАБОТКОЙ

Глава 7

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 7.1. Общие понятия процесса усиления

Сигнал, представляющий собой выходную величину того или иного датчика параметра процесса механообработки, используется для непосредственной индикации или подвергается обработке. В большинстве случаев выходной сигнал датчика электрический, но он может быть и другим по своей природе. Для проведения последующей обработки или для использования в различного рода исполнительных механизмах этот сигнал должен подвергнуться либо усилению, либо (в редких случаях) — ослаблению. Устройство, служащее для усиления поступающего на его вход сигнала, называется *усилителем*, а устройство для ослабления сигнала — *аттенюатором*. Усилители по своей физической природе могут быть весьма разнообразными. Классификация усилителей сигналов по их физической природе приведена на рис. 7.1.



Рис. 7.1. Классификация усилительных устройств

Независимо от их физической природы усилительные устройства характеризуются одними и теми же общими показателями, к числу которых относится прежде всего *коэффициент усиления*.

Для усилителей различной физической природы под коэффициентом усиления $K_{\text{и}}$ понимается отношение установившегося значения сиг-

нала $U_{\text{вых}}$ на выходе усилителя к установившемуся значению сигнала $U_{\text{вх}}$ на его входе. Разумеется, это безразмерная величина, определяемая выражением

$$K_{\text{и}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}.$$

Поскольку у современных усилителей коэффициент усиления может достигать нескольких тысяч, для сокращения масштаба часто применяют *логарифмический коэффициент усиления* $K_{\text{и}}$ (дБ), измеряемый в единицах, называемых *децибелы* (дБ).

По определению,

$$K_{\text{и}} \text{ (дБ)} = 20 \lg(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) = 20 \lg K_{\text{и}}.$$

Тогда $K_{\text{и}} = 10^{K_{\text{и}}(\text{дБ})/20}$.

Например, если известно, что $U_{\text{вх}} = 0,005 \text{ В}$, $U_{\text{вых}} = 8 \text{ В}$, то $K_{\text{и}} = 8/0,005 = 1600$, откуда получаем

$$K_{\text{и}} \text{ (дБ)} = 20 \lg 1600 = 20 \cdot 3,2 = 64 \text{ дБ}.$$

Если, наоборот, задан $K_{\text{и}} \text{ (дБ)} = 38 \text{ дБ}$, то $K_{\text{и}} = 10^{38/20} = 80$, поскольку безразмерный коэффициент усиления равен 10 в степени, равной отношению логарифмического коэффициента усиления к 20.

Заметим, что все рассмотренные характеристики усилителей являются общими и не учитывают особенностей физической природы явлений, положенных в основу построения того или иного усилителя. Однако известно, что существует аналогия между процессами, происходящими в линейных электрических цепях и линеаризованных гидравлических и пневматических цепях, а также в линейных механических системах. Так, можно провести аналогию между электрическим напряжением и пневматическим или гидравлическим давлением, а также между электрическим током и расходом жидкости или газа. Существует также аналогия между законом Ома для цепи постоянного тока и законом Гука, связывающим механические усилия и деформации. Поэтому удобно говорить об общих характеристиках усилителей, употребляя терминологию, непосредственно относящуюся к линейным токовым цепям.

Следует различать *усилители мощности* (при большом токе нагрузки и, следовательно, малом входном сопротивлении нагрузки) и *усилители напряжения* (при малом токе нагрузки и, следовательно, при большом входном сопротивлении нагрузки, близком к полному разрыву).

Нужно также иметь в виду, что в схемах усилителей всегда присутствуют те или иные реактивные элементы: емкость и индуктивность (называемая также «электромагнитной массой» и являющаяся мерой инертности), которые имеют буквальную аналогию в гидравлических и пневматических цепях. В результате фаза выходного сигнала не совпадает с фазой входного сигнала. Сдвиг фаз для различных гармонических частот, составляющих любой сигнал в соответствии с раз-

ложением Фурье, оказывается различным. Поэтому в каждый момент сумма частот на выходе не будет пропорциональной сумме частот, составляющих исходный сигнал на входе. Это происходит вследствие фазовых искажений, вносимых усилителем.

Зависимость сдвига фазы, вносимого усилителем, от частоты усиливаемого сигнала показана на рис. 7.2. В идеальном усилителе эта зависимость представляет собой прямую, проходящую через начало координат и направленную вниз. Это следует понимать таким образом, что все усиливаемые частоты в идеальном усилителе усиливаются одинаково, т. е. с одним и тем же коэффициентом усиления и одним и тем же временным запаздыванием. Но одна и та же абсолютная величина временного запаздывания для колебаний с большей частотой, т. е. с меньшим периодом, будет означать во столько же раз больший сдвиг фазы. Это и изображается на характеристике рис. 7.2 прямой 1. В реальном усилителе, содержащем реактивные элементы, фазовая характеристика отклоняется от прямой линии, что изображается на рис. 7.2 кривой 2. Здесь $\Delta\varphi$ — это фазовые искажения, создаваемые усилителем.

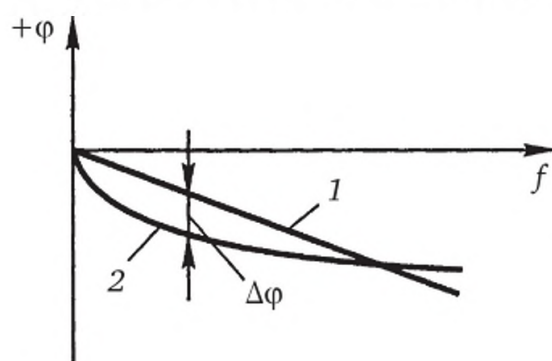


Рис. 7.2. Фазовая характеристика усилителя

В усилителях следует различать коэффициенты усиления *по току*, *по напряжению* и *по мощности*. Эти коэффициенты равны отношению соответствующих сигналов на входе и на выходе усилителя.

Следует также различать коэффициент усиления по мощности и *КПД усилителя*. КПД усилителя $\eta_{\text{ус}}$ равен отношению мощности выходного сигнала к мощности питания.

Чувствительность усилителя по току, напряжению или по мощности — это минимальное значение соответствующих величин, вызывающее изменение сигнала на выходе усилителя.

Динамический диапазон D_d усилителя по току, по напряжению или по мощности определяется как отношение соответствующего максимального входного сигнала к минимальному, при котором искажения не превышают допустимого значения:

$$D_d = I_{\text{вх макс}} / I_{\text{вх мин}}; D_d(\text{дБ}) = 20 \lg (I_{\text{вх макс}} / I_{\text{вх мин}}).$$

Динамический диапазон усилителя не может быть меньше динамического диапазона входного сигнала.

Динамический диапазон усилителя может быть определен по его амплитудной характеристике, изображенной на рис. 7.3. Участок характеристики 2—3 соответствует динамическому диапазону усиления. На участках 0—1 и 2—3 имеют место недопустимые нелинейные искажения.

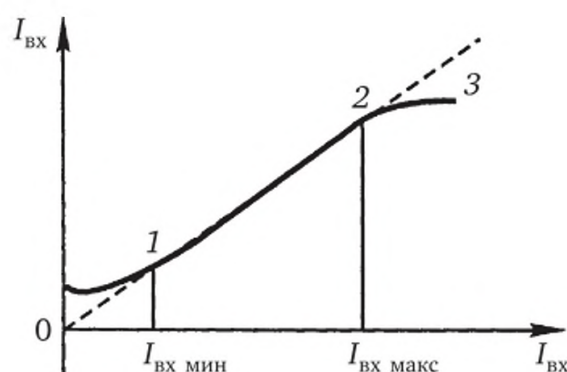


Рис. 7.3. Амплитудная характеристика усилителя

Как уже отмечалось, коэффициент усиления в общем случае будет различным для различных частот усиливаемого сигнала. Частотная характеристика усилителя есть зависимость коэффициента усиления данного усилителя от частоты усиливаемого сигнала. Частота откладывается в линейном или в логарифмическом масштабе по оси X , а на оси Y откладывается в линейном масштабе коэффициент усиления K на данной частоте.

Часто K откладывается в дБ.

Пример частотной характеристики усилителя приведен на рис. 7.4.

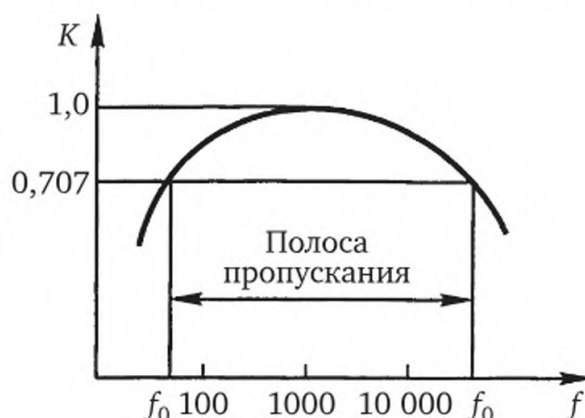


Рис. 7.4. Частотная характеристика усилителя

В идеальном усилителе частотная характеристика представляет собой горизонтальную прямую во всем диапазоне усиливаемых частот. Реальные усилители всегда имеют уменьшение усиления на низших и высших частотах (так называемый «завал» частотной характеристики). Обычно считают допустимым снижение коэффициента усиления по мощности вдвое по сравнению с максимальным (на 50 %). Учитывая, что для цепей электрического тока и эквивалентных им мощность

пропорциональна квадрату силы тока, двукратное снижение мощности пропорционально снижению коэффициента усиления по току или, при постоянной нагрузке, по напряжению в $\sqrt{2}$ раз, что составляет примерно 0,707. Диапазон частот $f_0 - f_1$, в котором коэффициент усиления составляет не менее 0,707 от максимального коэффициента усиления, называется *полосой пропускания* данного усилителя.

Величина частотных искажений M определяется как отношение коэффициента усиления на средней для полосы пропускания частоте f_{cp} к коэффициенту усиления на заданной частоте f . Это соответствует соотношению:

$$M \text{ (дБ)} = 20 \lg (K_{f_{cp}} / K_f).$$

В зависимости от вида усиливаемого сигнала, т. е. от области применения, усилители делятся следующим образом:

- *гармонические усилители*, предназначенные для усиления периодических сигналов, составляющие которых изменяются сравнительно медленно, например магнитофонные усилители для усиления колебаний звуковой частоты;
- *импульсные усилители*, предназначенные для усиления импульсных, периодических и непериодических сигналов, например компьютерные и телевизионные усилители, схемы автоматики и телемеханики;
- *усилители постоянного сигнала*, предназначенные для усиления постоянного сигнала в полосе частот от низшей частоты $f_n = 0$ до высшей частоты f_h ; выходной сигнал в таких усилителях пропорционален сумме постоянной и переменной составляющих входного сигнала;
- *усилители переменного сигнала*, предназначенные для усиления постоянного сигнала в полосе частот от низшей частоты $f_n > 0$ до высшей частоты f_h ; выходной сигнал в таких усилителях пропорционален только переменной составляющей входного сигнала.

В полосе частот усиливаемых сигналов выделяют усилители *низкой частоты* и *высокой частоты*.

По характеру частотной характеристики усилители делят на *резонансные* и *полосовые*. Резонансные усилители в отличие от полосовых имеют пик коэффициента усиления на некоторой резонансной частоте, определяемой обычно резонансной кривой включенного параллельно колебательного контура или элемента.

В зависимости от ширины полосы частот, на которых происходит резонанс усиления, усилители делят на *узкополосные* и *широкополосные*.

§ 7.2. Электронные усилители

Простейший однокаскадный электронный усилитель на базе одного усилительного элемента — транзистора или усилительной электронной

вакуумной лампы — уже рассматривался выше при описании электронного контактного датчика и фотореле.

Для схем автоматики и управления различными объектами в машиностроении большой интерес представляет так называемый *фазочувствительный* электронный усилитель. В таком усилителе информация кодируется сдвигом фазы напряжения управляющего гармонического сигнала U_0 относительно другого гармонического сигнала $U_{оп}$, называемого опорным. Амплитуды управляющего и опорного сигналов остаются при этом неизменными, что делает подобные системы более помехоустойчивыми. Датчики, используемые в механообработке, изменяют именно фазовый угол снимаемого с них напряжения. Таковы резольверы и индуктосины, а также все датчики, основанные на изменении их емкости, индуктивности или активного сопротивления, в том числе различного рода резистивные датчики.

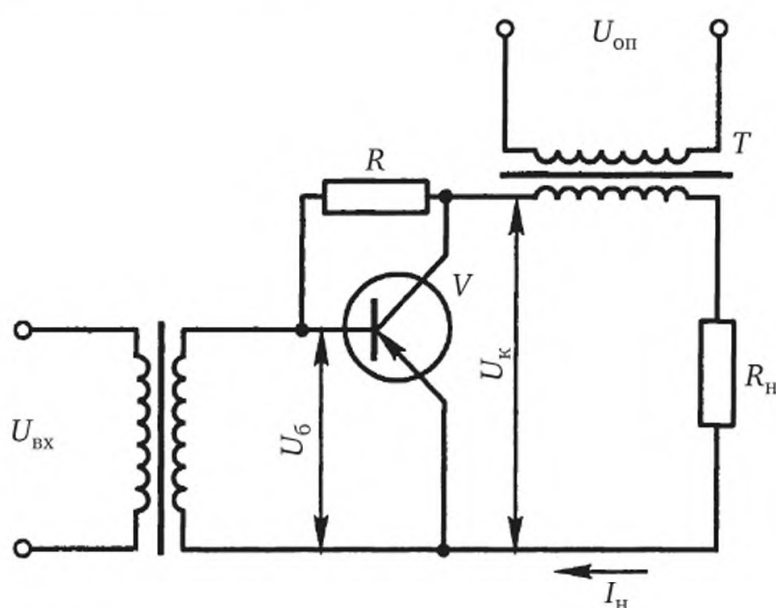


Рис. 7.5. Принципиальная схема однополупериодного фазочувствительного усилителя

Схема простейшего однополупериодного фазочувствительного усилителя приведена на рис. 7.5. Работает эта схема следующим образом (см. графики на рис. 7.6). Транзистор V пропускает ток нагрузки только тогда, когда на его коллектор подается отрицательное напряжение. Это происходит только в течение одного полупериода опорного напряжения $U_{оп}$.

Ток нагрузки $I_Н$ определяется не только мгновенным значением и полярностью коллекторного напряжения, но также полярностью и мгновенным значением напряжения $U_б$ на базе транзистора. При $U_{вх} = 0$ напряжение на базе транзистора $U_б = 0$ и амплитуда тока нагрузки $I_Н$ будет определяться нулевым током базы (кривая 1 на рис. 7.6). Величину этого тока устанавливают при регулировке усилителя подбором величины резистора R .

Если напряжение на базе U_{61} отрицательное, т. е. совпадает по фазе ($\varphi = 0^\circ$) с опорным напряжением, то транзистор открывается и амплитуда тока в нагрузке I_H максимальна (кривая 2 на рис. 7.6).

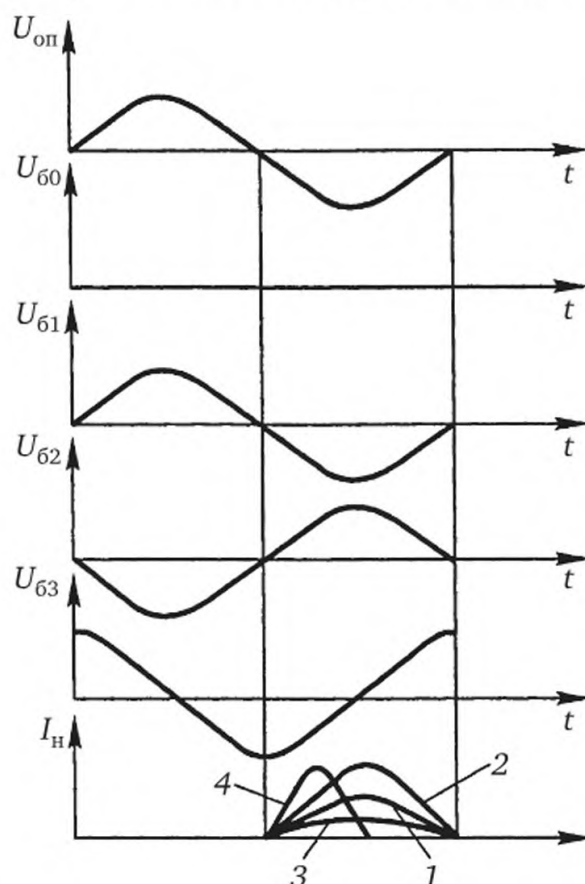


Рис. 7.6. Токи и напряжения в однополупериодном фазочувствительном усилителе

Если в тот полупериод, когда $U_{оп}$ отрицательно, U_{62} положительно, т. е. входной сигнал и опорное напряжение находятся в противофазе ($\varphi = 180^\circ$), амплитуда тока нагрузки I_H становится минимальной (кривая 3 на рис. 7.6).

Если этот сдвиг фаз между опорным и входным напряжением равен какому-либо промежуточному значению между 0 и 180° , например 90° , что соответствует напряжению на базе U_{63} (см. рис. 7.6), то четверть периода напряжение на базе будет увеличивать силу тока в нагрузке, а четверть периода — уменьшать (кривая 4).

Недостатком такой схемы, как и всех однополупериодных схем переменного тока, является то, что ток через нагрузку протекает только в течение одного полупериода, а во время второго полупериода нагрузка отключена.

Значительно чаще применяется *двухполупериодный* фазочувствительный усилитель. Его схема приведена на рис. 7.7 и работает следующим образом (см. рис. 7.8). Относительно средней точки вторичной обмотки трансформатора T_2 напряжения U_1 и U_2 имеют вид, показанный на рис. 7.8, а. Напряжение U_1 по фазе совпадает с опорным

напряжением, а напряжение U_2 находится ему в противофазе. Выходным сигналом является разность токов I_1 и I_2 . В примере, приведенном на рис. 7.8, она порождает разность магнитных потоков в обмотке возбуждения вспомогательного двигателя М, подключенной в качестве нагрузки.

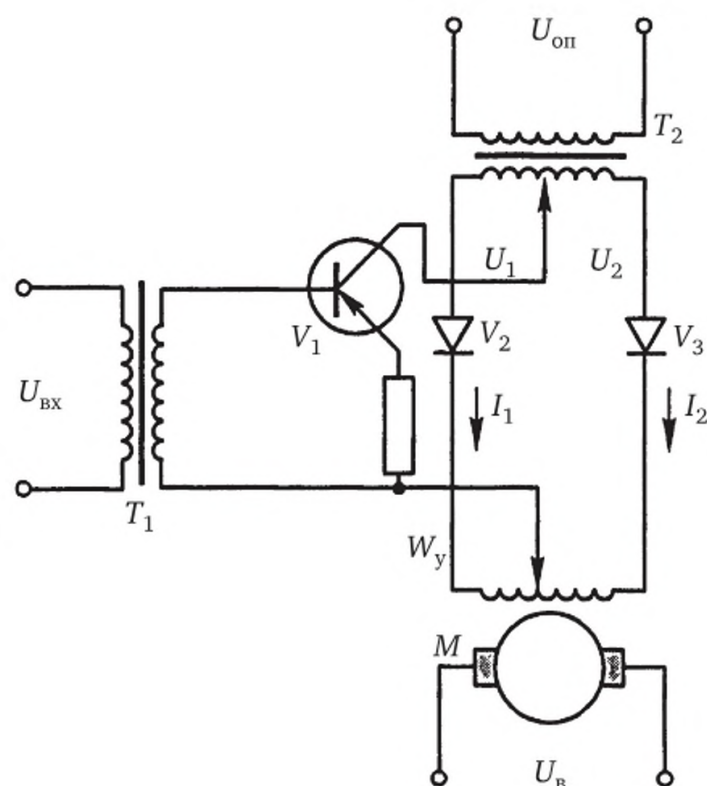


Рис. 7.7. Схема двухполупериодного фазочувствительного усилителя

Ток I_1 может протекать только тогда, когда напряжение U_1 будет иметь положительную полярность относительно диода V_2 , а входное напряжение на базе транзистора V_1 будет отрицательным. Ток I_2 может протекать только тогда, когда напряжение U_2 будет иметь положительную полярность относительно диода V_3 , а входное напряжение на базе транзистора V_1 будет отрицательным.

При фазовом сдвиге между $U_{\text{оп}}$ и $U_{\text{вх}}$, равном 90° , средние значения токов I_1 и I_2 за период равны между собой, что показано на рис. 7.8, б. Поэтому магнитные потоки, создаваемые в обмотке возбуждения встречными и равными токами I_1 и I_2 , взаимно уничтожаются, и двигатель не вращается.

Если фазовый сдвиг между напряжениями $U_{\text{оп}}$ и $U_{\text{вх}}$ $\varphi_1 > 90^\circ$, то среднее значение тока I_1 оказывается большим, чем среднее значение тока I_2 , что показано на рис. 7.8, в, и ротор двигателя будет вращаться, предположим, по часовой стрелке.

Если фазовый сдвиг между напряжениями $U_{\text{оп}}$ и $U_{\text{вх}}$ $\varphi_2 < 90^\circ$, то среднее значение тока I_1 оказывается меньшим, чем среднее значение тока I_2 , что показано на рис. 7.8, г, и ротор двигателя будет вращаться в противоположном направлении.

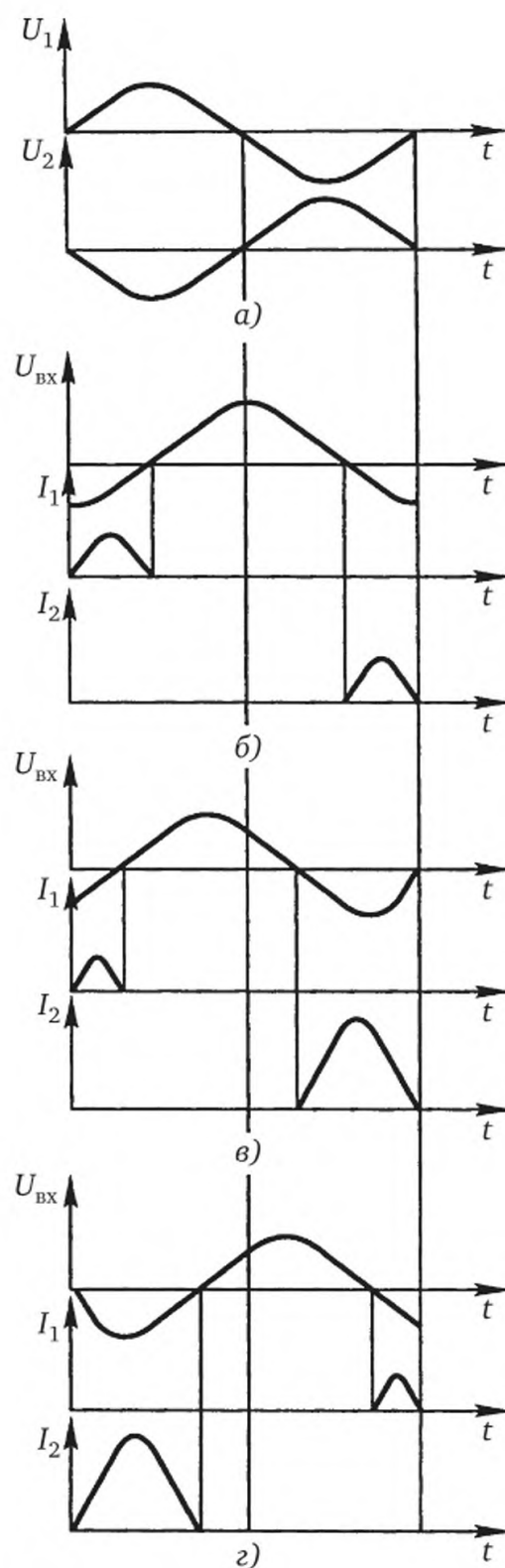


Рис. 7.8. Циклограммы работы двухполупериодного фазочувствительного усилителя

Разность магнитных потоков управления будет тем большей, чем больше разность токов I_1 и I_2 , которая зависит от того, насколько фазовый сдвиг входного сигнала по отношению к опорному напряжению отличается от 90° . Знак разности средних значений этих потоков и направление вращения двигателя зависят от знака фазового сдвига.

§ 7.3. Магнитные усилители

Магнитным усилителем (МУ) называется электромагнитное устройство, предназначенное для усиления электрических сигналов, в котором используется зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, помещенных в переменное магнитное поле, от величины постоянного подмагничивающего поля, создаваемого или изменяемого входным сигналом.

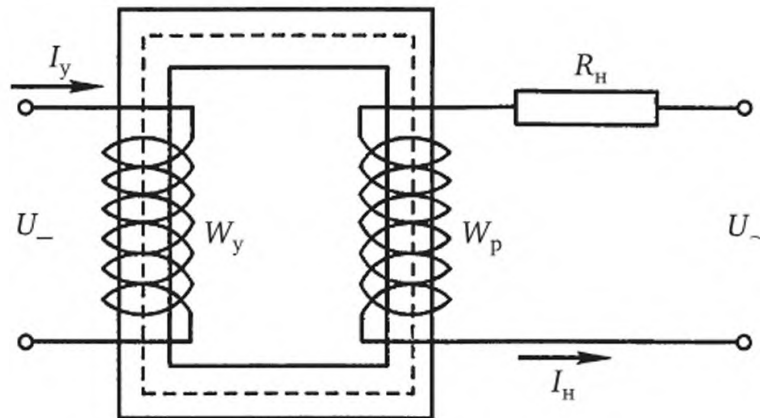


Рис. 7.9. Схема дросселя с подмагничиванием

Сигнал постоянного тока в магнитных усилителях преобразуется в сигнал переменного тока, поэтому МУ часто используют в качестве первого каскада усиления для электронного усилителя переменного тока. МУ широко применяются в схемах автоматики вследствие своей высокой надежности и долговечности, обусловленных отсутствием движущихся частей и нечувствительностью к механическим перегрузкам, устойчивости к работе при высоких и низких температурах и в условиях повышенной влажности, а также вследствие присущих им высокого КПД и коэффициента усиления и возможности усиления маломощных сигналов постоянного тока.

Недостатком магнитного усилителя является инерционность, определяемая его высокой индуктивностью, что ограничивает его применение в системах автоматики, требующих минимального времени реагирования, например, в следящих системах.

Принцип работы такого усилителя рассмотрим на примере так называемого дросселя с подмагничиванием, изображенного на рис. 7.9. На этой схеме обмотка управления питается постоянным напряжением U_- входного сигнала, а рабочая область переменного тока I_H определяется переменным напряжением $U_~$. Последовательно с рабочей обмоткой включено сопротивление нагрузки R_H . Переменный ток I_H в рабочей обмотке W_p определяется соотношением

$$I_H = \frac{U_~}{\sqrt{R^2 + X_L^2}},$$

где $X_L = \omega L$, а $\omega = 2\pi f$.

Индуктивность L определяется по формуле

$$L = \mu_0 \mu (w_p^2 S) / l,$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, Г/м; S — площадь сердечника дросселя, м²; l — длина средней силовой линии в сердечнике дросселя, м; w_p — число витков рабочей обмотки W_p ; μ — магнитная проницаемость сердечника дросселя для переменной составляющей магнитного поля, Г/м. Величина μ определяется из соотношения

$$\mu = B/H,$$

где H — напряженность магнитного поля, а B — его индукция.

При $U_{вх} = U_- = 0$ $H_1 = 0$, а I_H определяется магнитной проницаемостью в положении на кривой намагничивания, симметричном относительно оси ординат. При $U_{вх} \neq 0$ $U_- \neq 0$ и $H_1 \neq 0$. Это смещает рабочую точку на кривой намагничивания. Значит, с увеличением постоянного тока подмагничивания магнитная проницаемость сердечника уменьшается, что приводит к уменьшению индуктивного сопротивления дросселя и к увеличению тока нагрузки I_H .

Если кривая намагничивания имеет большую крутизну, то небольшое изменение входного сигнала приводит к значительному изменению мощности нагрузки.

Однако такой дроссель применять в качестве магнитного усилителя нецелесообразно, так как его рабочая обмотка создает в сердечнике переменный магнитный поток, так что в управляющей обмотке наводится ЭДС, противодействующая входному сигналу. Это снижает КПД усиления и вносит дополнительные шумы. Поэтому практически простейший магнитный усилитель собирают из двух сердечников, как показано на рис. 7.10.

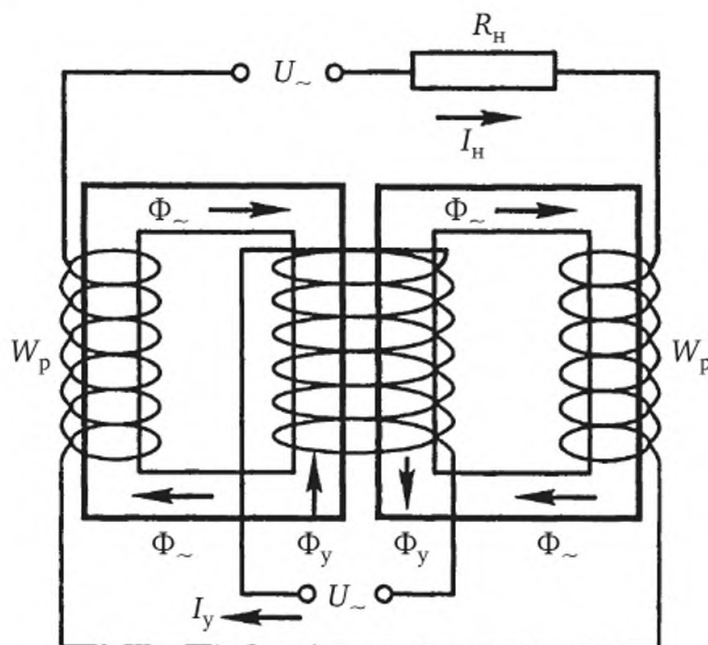


Рис. 7.10. Схема магнитного усилителя из двух сердечников

Статическая характеристика такого усилителя приведена на рис. 7.11.

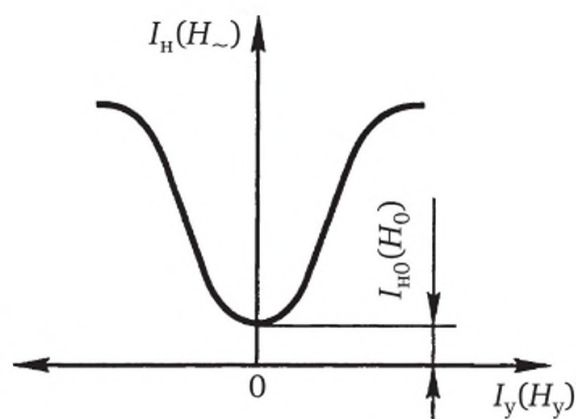


Рис. 7.11. Статическая характеристика магнитного усилителя из двух сердечников

В этом магнитном усилителе I_{H0} — начальный холостой ток при $I_y = 0$. Рабочую обмотку наматывают таким образом, чтобы магнитные потоки, создаваемые ею в обоих сердечниках, действовали навстречу друг другу, и ЭДС, индуцируемые ими в обмотке управления, взаимно компенсировались. Это и показано на рис. 7.10. Такая взаимная компенсация составляет принципиальное преимущество этой схемы перед схемой с дросселем насыщения.

Однако для рассмотренных выше схем характерно то, что входным сигналам разного знака, но равным по модулю соответствуют одни и те же значения выходного сигнала. Это видно из рис. 7.11, где статическая характеристика магнитного усилителя, состоящего из двух сердечников, представляет собой график, симметричный относительно оси ординат. Значит, такой усилитель не реагирует на знак входного сигнала.

Чтобы сделать магнитный усилитель чувствительным к знаку входного сигнала, не изменяя физическую природу явлений, положенных в основу его работы, нужно сместить начальную рабочую точку на его статической характеристике. Это достигается путем создания дополнительного постоянного магнитного поля за счет введения дополнительной обмотки постоянного тока, которая так и называется обмоткой смещения. Схема такого магнитного усилителя изображена на рис. 7.12.

В магнитном усилителе со смещением ток I_H в нагрузке R_H изменяется по знаку в зависимости от полярности сигнала управления. При $I_y = 0$ величина тока I_{H0} уже не будет минимальной. Значение I_H будет расти или падать в зависимости от полярности сигнала I_y . Введение начального подмагничивания (начального смещения) повышает также коэффициент усиления для малых значений I_y . Это обусловлено тем, что области малых значений I_y будет соответствовать участок статической характеристики усилителя, обладающий значительной крутизной, как это видно на рис. 7.13.

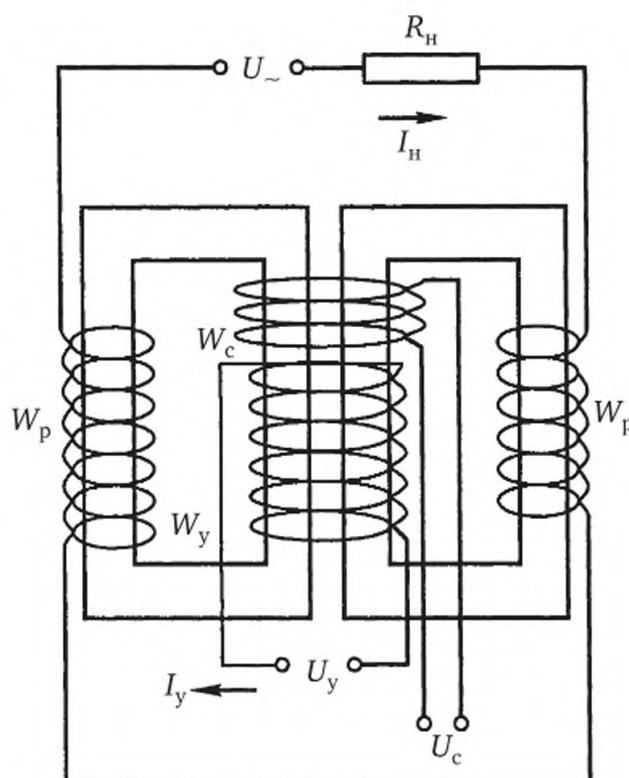


Рис. 7.12. Схема магнитного усилителя со смещением

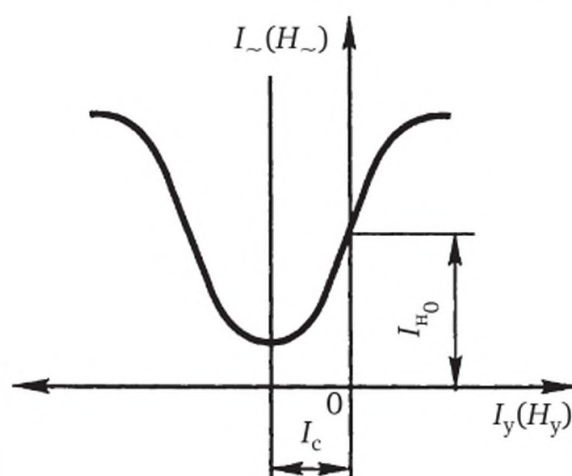


Рис. 7.13. Статическая характеристика магнитного усилителя со смещением

§ 7.4. Электромашинные усилители

Для управления мощными устройствами (до нескольких десятков кВт) применяют так называемые *электромашинные усилители* (ЭМУ).

Электромашинный усилитель представляет собой генератор постоянного тока, приводимый во вращение с постоянной скоростью специальным приводом. Обычно таким приводом является трехфазный нерегулируемый асинхронный двигатель переменного тока. На обмотку

возбуждения электромашиного усилителя подается усиливаемый сигнал, а выходным сигналом является напряжение, снимаемое со щеток генератора. Показателем усиления здесь служит коэффициент усиления по мощности K_p , равный отношению выходной электрической мощности $P_{\text{вых}}$ к входной электрической мощности $P_{\text{вх}}$:

$$K_p = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}.$$

ЭМУ обладает электромагнитной инерцией, которая характеризуется постоянной времени эквивалентной электромагнитной цепи T , причем $T = L/R$. Наибольшую электромагнитную инерцию имеет цепь управления выходной ступени, так как эта ступень наиболее мощная и в ней расходуется наибольшая электромагнитная энергия. Обычно в ЭМУ постоянная времени составляет 0,02...0,25 с.

Для увеличения коэффициента усиления необходимо увеличивать число витков обмотки управления (возбуждения). Это приводит к увеличению индуктивности обмотки и росту постоянной времени. Потому для сравнительной оценки качества ЭМУ различных видов необходимо сопоставлять как коэффициент усиления по мощности K_p , так и постоянную времени T . Отношение этих величин называется коэффициентом добротности ЭМУ:

$$K_d = K_p / T.$$

Чем больше K_d , тем совершеннее ЭМУ.

Генератор постоянного тока является простейшим ЭМУ, что показано на рис. 7.14. На этой схеме двигатель M_1 вращает с постоянной скоростью n_0 якорь генератора G . Обычно это асинхронный трехфазный нерегулируемый двигатель переменного тока, но может быть также использован двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов со стабилизатором оборотов (центробежным вибрационным регулятором), а также и другие типы двигателей с постоянными оборотами. Напряжение со щеток ЭМУ поступает на щетки исполнительного двигателя M_2 с независимым возбуждением. Напряжение, поступившее на щетки исполнительного двигателя M_2 , пропорционально управляющему напряжению U_y , поступившему на обмотку возбуждения ЭМУ.

В зависимости от способа возбуждения все ЭМУ делятся на ЭМУ продольного поля, где основной поток возбуждения направлен по продольной оси машины, и ЭМУ поперечного поля.

На рис. 7.14 представлена схема однокаскадного усилителя продольного поля. Такую схему называют также схемой с независимым возбуждением. Мощность управления P_y составляет здесь примерно 1...3 % выходной мощности. Следовательно, коэффициент усиления по мощности K_p составляет здесь 30...100.

Можно соединить два ЭМУ так, чтобы первый был возбудителем второго. В результате получается двухкаскадный усилитель, коэффици-

ент усиления которого равен произведению коэффициентов усиления каждого каскада:

$$K_{p\text{ обш}} = K_{p1}K_{p2}.$$

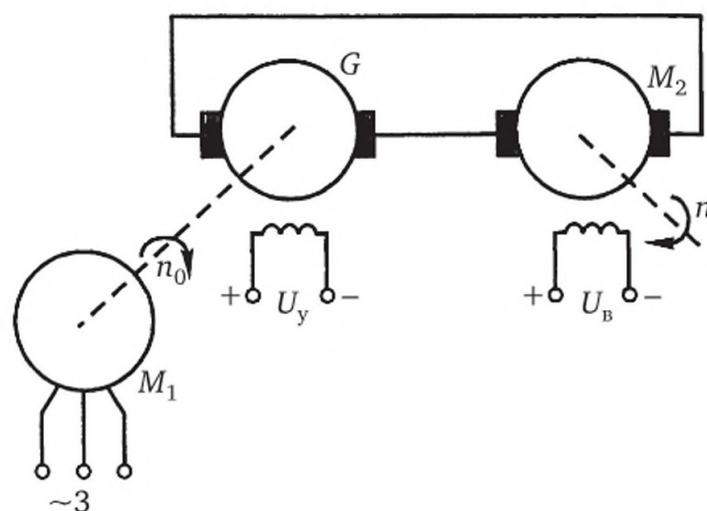


Рис. 7.14. Принципиальная схема простейшего ЭМУ

Увеличить коэффициент усиления можно введением положительной обратной связи. Если в дополнение к независимому возбуждению в ЭМУ ввести обмотку самовозбуждения, то к обмотке управления потребуется подводить только часть энергии, необходимой для создания потока. Остальная необходимая энергия будет поступать от обмотки самовозбуждения в виде положительной обратной связи. Обмотку самовозбуждения можно включать как последовательно, так и параллельно с обмоткой якоря. Для того чтобы предотвратить самопроизвольное возбуждение ЭМУ, необходимо установить сопротивление цепи самовозбуждения несколько большим определенного порога, называемого *критическим сопротивлением*. Это показано на рис. 7.15. На этом рисунке: W_y — обмотка управления; $W_{св}$ — обмотка самовозбуждения; R — резистор регулирования процесса самовозбуждения.

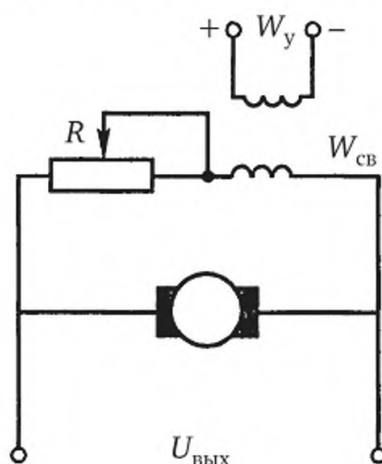


Рис. 7.15. Схема ЭМУ с дополнительной обмоткой самовозбуждения

В обычной электромашине постоянного тока поперечная реакция якоря искажает поле главных полюсов и вызывает искрение щеток. Поэтому принимают меры для ослабления поперечной реакции якоря. В ЭМУ с поперечным полем поперечный магнитный поток реакции якоря используется для получения ЭДС. С этой целью на коллекторе двухполюсной электромашины устанавливают дополнительную пару щеток $q - q$, ось которых перпендикулярна оси основных щеток $d - d$, как показано на рис. 7.16.

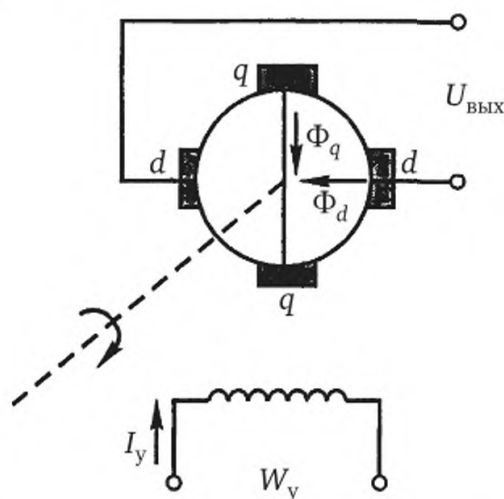


Рис. 7.16. Схема двухкаскадного ЭМУ с поперечным полем

На этом рисунке двигатель, вращающийся с постоянной скоростью якорь ЭМУ, условно не показан. Обмотка W_y расположена на полюсах генератора, образующего ЭМУ. На нее подается управляющий ток I_y . В результате взаимодействия магнитодвижущей силы $I_y w_y$, где w_y — число витков обмотки W_y , вдоль продольной оси электромашины создается поток Φ_q . Под действием этого потока в поперечной цепи электромашины наводится ЭДС E_q . Поперечная пара щеток $q - q$ замыкается накоротко или через небольшое сопротивление подмагничивающей обмотки W_n . Поэтому даже небольшая E_q вызывает значительный ток I_q , который, протекая по обмотке якоря, создает поперечный магнитный поток Φ_d . Якорь, вращаясь в созданном самим собой поперечном магнитном поле, наводит ЭДС продольной цепи E_d . Под действием E_d в цепи нагрузки возникает ток I_d .

Такой усилитель представляет собой одноякорный двухступенчатый (двухкаскадный) усилитель, у которого поток второй ступени создается поперечной реакцией якоря первой ступени усиления. Поэтому такие ЭМУ называют также *ЭМУ поперечного поля*.

Усилитель, принципиальная схема которого показана на рис. 7.16, работоспособен только при небольших токах нагрузки I_d . Сущность этого явления видна из следующего. Если к щеткам продольной цепи подключить нагрузку R_n , то через обмотку якоря пойдет ток I_d . Возникающая при этом реакция якоря будет направлена вдоль продольной оси и будет действовать навстречу управляющему потоку Φ_y . Для

компенсации продольной реакции якоря в ЭМУ с поперечным полем кроме управляющей обмотки помещают также компенсационную обмотку. Компенсационная обмотка включается последовательно в цепь нагрузки, нейтрализуя размагничивающее действие нагрузочного тока. Это изображено на рис. 7.17. Поток реакции якоря Φ_p должен уравниваться потоком Φ_k компенсационной обмотки. Соответствующие характеристики ЭМУ приведены на рис. 7.18.

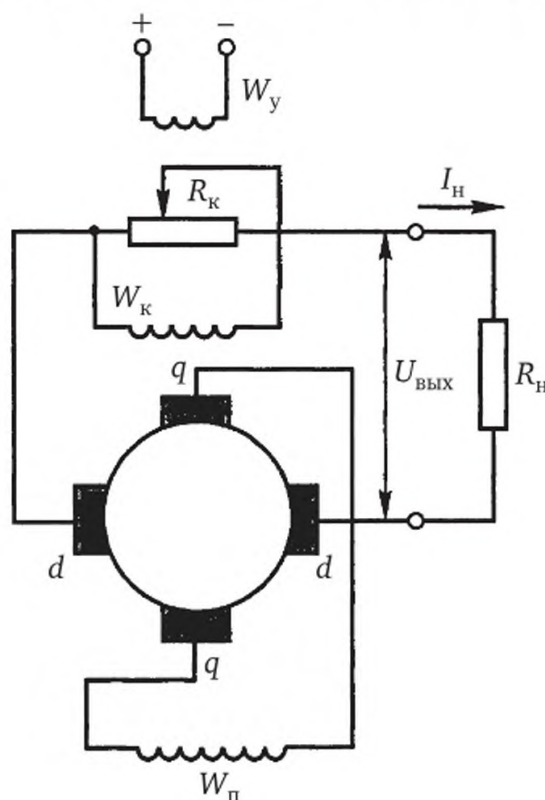


Рис. 7.17. Схема ЭМУ с компенсацией и подмагничиванием

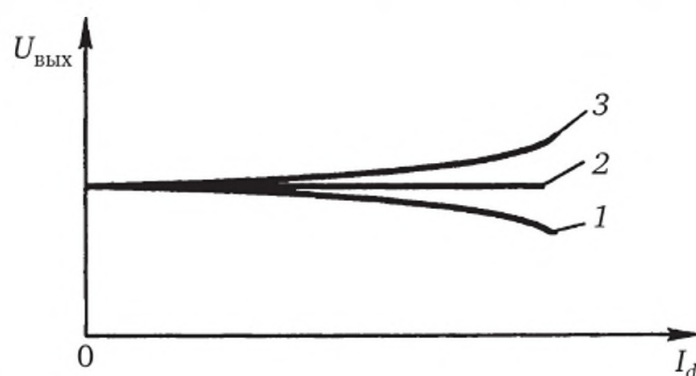


Рис. 7.18. Выходные характеристики ЭМУ с поперечным полем

При $\Phi_k < \Phi_p$ (кривая 1 на рис. 7.18) электромашина недокомпенсирована, и при большом токе нагрузки усиление падает. При $\Phi_k > \Phi_p$ электромашина перекомпенсирована, и чем больше входной ток, тем больше усиление (это означает возникновение нелинейных искажений). Этот случай соответствует кривой 3 на рис. 7.18. И наконец,

при $\Phi_k = \Phi_p$ (прямая 2, параллельная оси абсцисс на рис. 7.18) рассматриваемая электромашина является скомпенсированной. Ток в обмотке W_k регулируют, изменяя сопротивление реостата R_k . Обмотка подмагничивания W_p увеличивает чувствительность ЭМУ при малых входных сигналах. Она способствует возрастанию основного продольного потока, вызываемого поперечным током I_d , что позволяет уменьшить искрение щеток.

Общий коэффициент усиления ЭМУ с поперечным полем обычно составляет 10 000, но может достигать 100 000. Постоянная времени при этом составляет 0,1...0,25 с. При мощности до нескольких кВт ЭМУ и приводной асинхронный двигатель обычно конструктивно размещают в одном корпусе.

Контрольные вопросы

1. Что называется усилителем?
2. Как усилители классифицируются по своей физической природе?
3. Что такое коэффициент усиления?
4. Что такое логарифмический коэффициент усиления?
5. Как связаны между собой коэффициент усиления, заданный в децибелах, и коэффициент усиления, заданный отношением?
6. Как определяется КПД усилителя?
7. Что такое чувствительность усилителя?
8. Что такое динамический диапазон усилителя?
9. Что такое полоса пропускания усилителя?
10. Что такое частотные искажения усилителя?
11. Что такое амплитудные искажения усилителя?
12. Что такое фазовые искажения усилителя?
13. Что такое частотная характеристика усилителя?
14. Какова должна быть частотная характеристика идеального усилителя?
15. Как определяется величина частотных искажений усилителя?
16. Что такое гармонический усилитель?
17. Что такое импульсный усилитель?
18. Что такое резонансный усилитель?
19. Что такое узкополосные и широкополосные усилители?
20. На каком элементе базируется простейший электронный усилитель?
21. Приведите примеры использования в машиностроении приборов на базе простейшего электронного усилителя.
22. Что такое фазочувствительный усилитель и почему он особенно важен для задач машиностроения?
23. Что такое однополупериодный фазочувствительный усилитель?
24. Как выглядят статические характеристики однополупериодного фазочувствительного усилителя?
25. Каковы основные недостатки однополупериодного фазочувствительного усилителя?
26. Что такое двухполупериодный фазочувствительный усилитель?
27. Как выглядят статические характеристики двухполупериодного фазочувствительного усилителя?
28. На каких физических явлениях базируется магнитный усилитель?
29. Каковы основные достоинства и недостатки магнитного усилителя?

30. Какова область применения магнитных усилителей в машиностроении?
31. Что такое дроссель насыщения и как он работает?
32. Каковы основные недостатки дросселя насыщения?
33. С какой целью применяются магнитные усилители на двух сердечниках?
34. Каковы статические характеристики магнитного усилителя на двух сердечниках?
35. Как можно сделать магнитный усилитель чувствительным к знаку усиливаемого сигнала?
36. Что такое электромашинный усилитель?
37. Какие двигатели обычно используются для привода электромашинного усилителя?
38. Что такое одно- и двухкаскадный электромашинный усилитель?
39. Какой коэффициент усиления может быть достигнут на одном каскаде электромашинного усилителя?
40. Что такое постоянная времени одного каскада электромашинного усилителя, из-за чего она возникает и в каких пределах колеблется?
41. Как в электромашинных усилителях используется явление реакции якоря?
42. Как устроен и работает электромашинный усилитель с поперечным полем?
43. Какую роль в электромашинных усилителях играет дополнительная обмотка подмагничивания?
44. Какую роль в электромашинных усилителях играет компенсационная обмотка?
45. Что такое скомпенсированный электромашинный усилитель и какова его выходная характеристика?
46. Что такое недокомпенсированный электромашинный усилитель и какова его выходная характеристика?
47. Что такое перекомпенсированный электромашинный усилитель и какова его выходная характеристика?
48. Какие коэффициенты усиления и постоянные времени характерны для двухкаскадных скомпенсированных электромашинных усилителей?

Глава 8

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 8.1. Общие характеристики релейных элементов

Релейные переключательные элементы служат для коммутации цепей в различных схемах, используемых в системах автоматики, исследовательских установках и вообще в технических устройствах, реализующих те или иные процессы. Суть работы такого переключающего элемента заключается в том, чтобы под влиянием того или иного воздействия направлять (перекоммутировать) различные потоки по заранее заданным направлениям. Эти коммутируемые потоки по своей физической природе могут быть весьма различными:

- электрическими (различного рода токами: переменными и постоянными);
- гидравлическими (потоками различных жидкостей);
- пневматическими (потоками различных газов, в частности, воздуха);
- световыми;
- механическими.

В первых четырех случаях переключательные элементы принято называть соответственно электрическими, гидравлическими, пневматическими или оптическими реле, а в последнем случае — муфтами.

Управляющее воздействие по своей физической природе также может быть весьма разнообразным, а именно:

- механическим (в том числе ручным);
- электрическим (подачей или снятием напряжения);
- гидравлическим или пневматическим (подачей или снятием соответствующего давления);
- световым (включением или выключением светового сигнала).

В зависимости от того, что является входной величиной, а что коммутируется на выходе, получают различные переключающие элементы, которые сведены в табл. 8.1.

Для построения логических электрических, гидравлических и пневматических сетей используются переключательные элементы соответствующей физической природы.

Однако независимо от их физической сущности переключательные элементы должны обладать *релейной* зависимостью между входным

и выходным сигналом. Это значит, что при превышении входной величиной $X_{вх}$ некоторого уровня, называемого *порогом срабатывания* $X_{ср}$, выходная величина $X_{вых}$ «скачком» переключается в положение, соответствующее состоянию *насыщения*, и при дальнейшем увеличении $X_{вх}$ величина $X_{вых}$ не изменяется. Это состояние выходной величины условно обозначается «1». До того как входная величина, повышаясь от 0 до $X_{ср}$, вызвала переключение выходной величины $X_{вых}$ в состояние 1, эта выходная величина сохраняет другое постоянное значение, как правило, нулевое, которое условно обозначается «0». Для того чтобы при обратном ходе, уменьшаясь от значения, большего порога срабатывания $X_{ср}$, входная величина $X_{вх}$ вызвала обратное переключение выходной величины $X_{вых}$ из состояния «1» в состояние «0», нужно, чтобы эта входная величина упала до уровня, меньшего так называемого *порога отпущения* $X_{отп}$.

Таблица 8.1

Различные виды переключающих элементов

Вход \ Выход	Электрический	Гидравлический	Пневматический	Оптический	Механический
Электрический	Коммутирующее реле	Реле гидравлического давления	Реле пневматического давления	Фото-реле, фототранзистор	Кнопка, путевой выключатель
Гидравлический	Электрогидравлический преобразователь	Клапан, золотник	Клапан, золотник	—	Кран, гидравлический клапан
Пневматический	Электропневматический преобразователь	Клапан, золотник	Клапан, золотник	—	Пневмокран, пневматический клапан
Оптический	Лампочка, светодиод	—	—	Лазер	Шторка, затвор
Механический	Муфта	Гидрозажим	Пневмозажим	—	Рычаг, защелка

Релейные характеристики переключающих элементов изображены на рис. 8.1. Как правило, в переключающих элементах $X_{отп} < X_{ср}$, что соответствует графику на рис. 8.1, а, но может также быть $X_{отп} = X_{ср}$ (рис. 8.1, б) и $X_{отп} > X_{ср}$ (рис. 8.1, в). Явление, заключающееся в том, что $X_{отп} \neq X_{ср}$, называется гистерезисом. Величина $X_{ср} - X_{отп}$ называется шириной петли гистерезиса. Гистерезис может быть отрицательным, положительным и нулевым.

Может также оказаться, что $X_{отп} < 0$, как изображено на рис. 8.2, а. Это соответствует так называемому элементу «с памятью». Здесь снятие входного сигнала, после того как он ранее превысил порог срабаты-

вания, не приводит к изменению ранее установленного единичного состояния выходной величины $X_{\text{вых}}$. Для возвращения этой выходной величины в исходное нулевое состояние нужно подать на вход некоторый сигнал противоположного знака, так чтобы $X_{\text{вх}} < X_{\text{отп}}$. В некоторых конструкциях переключающих элементов на выходе может быть не два, а три состояния, которые условно можно назвать состояниями «-1», «0» и «+1». Это соответствует перекидному контакту в электроконтактных схемах и трехпозиционному золотнику в гидравлических схемах. Такая характеристика с симметричным относительно нуля гистерезисом приведена на рис. 8.2, б.

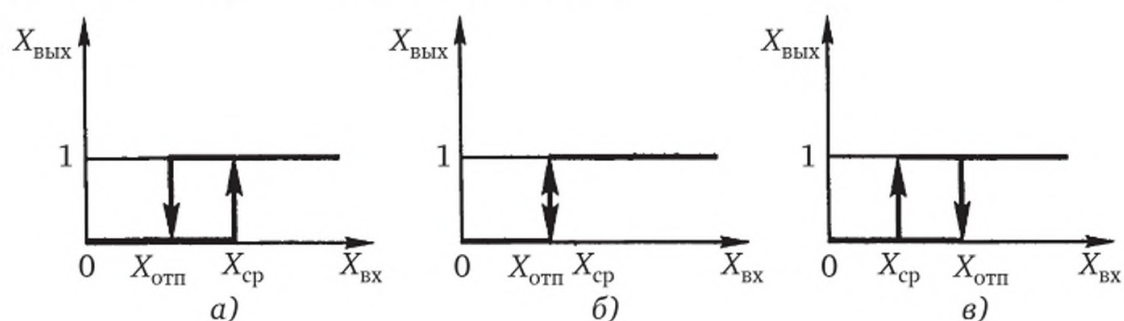


Рис. 8.1. Релейные характеристики переключающих элементов

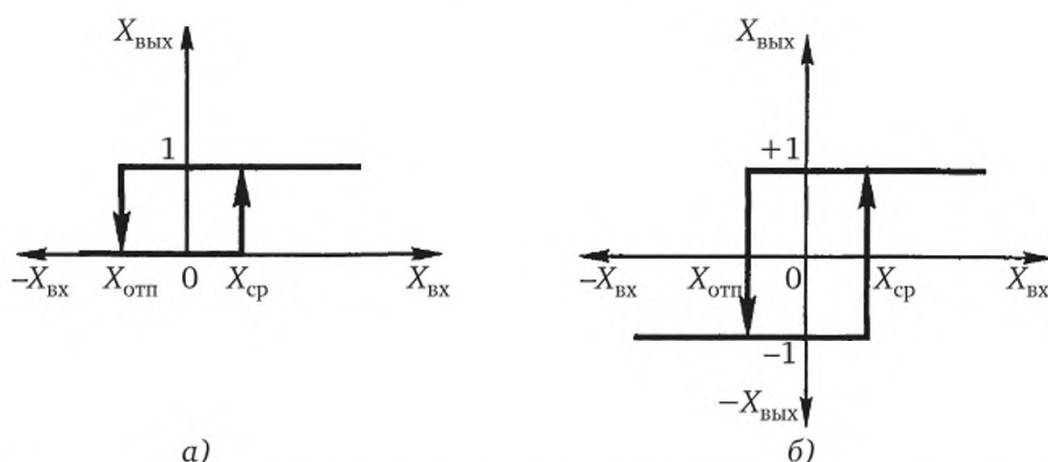


Рис. 8.2. Статические характеристики переключающих элементов с гистерезисом

Таким образом, вход переключающего элемента должен принимать дискретные значения: одно, большее порога срабатывания (с определенным запасом), можно условно считать единичным, а другое, меньшее порога отпуская (также с определенным запасом), можно условно считать нулевым. Выходы переключающего элемента также являются дискретными, и в большинстве случаев они также принимают два значения: нулевое и единичное. Сеть, собранная из переключающих элементов, называется *переключательной схемой*. В переключательной схеме срабатывания одних элементов вызывают срабатывания других, т. е. устанавливаются соответствующие комму-

тационные связи. Некоторые сигналы являются при этом аргументами происходящих переключений, а другие — функциями этих аргументов.

Применительно к переключательным схемам, как и к прочим техническим устройствам, должны решаться задачи *анализа* и *синтеза*. Анализ переключательной схемы заключается в установлении зависимостей, связывающих состояние данной схемы в целом с состояниями составляющих ее элементов. Синтез переключательной схемы заключается в установлении таких связей между базовыми переключательными элементами, при которых создаваемая переключательная схема будет заданным образом реагировать на изменения состояний составляющих ее элементов.

Для описания процессов, происходящих в переключательных схемах, был разработан специальный математический аппарат, называемый логикой переключательных схем, или алгеброй логики, или булевой алгеброй (по фамилии английского математика Буля, разработавшего основы этого математического аппарата). Для алгебры логики характерно то, что в отличие от школьной алгебры аргументы здесь могут принимать только два значения: 0 и 1. Функции также могут принимать только два значения: «ложно» и «истинно», обозначаемые также 0 и 1.

В простейшем случае рассматривается соединение двух переключательных элементов, входами которых являются дискретные двужначные аргументы X_1 и X_2 . Эти элементы могут соединяться между собой различными способами, так что выход построенной сети Y будет различным в зависимости от того, как между собой соединены исходные переключательные элементы. Таким образом, величина Y будет представлять собой булеву функцию от аргументов X_1 и X_2 .

Как и всякая функция, она может быть представлена либо в виде аналитической записи, либо в виде таблицы, либо в графической форме. Возможные состояния переключательных элементов представлены в табл. 8.2, называемой таблицей состояний, или диаграммой Вейча.

Таблица 8.2

Таблица состояний переключательных элементов

X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3
0	0	0	0	1
1	0	0	1	0
0	1	0	1	1
1	1	1	1	0

Как видно из этой таблицы, функция Y_1 принимает единичное значение только тогда, когда и X_1 , и X_2 принимают единичное значение. Это соответствует последовательному соединению соответствующих переключательных элементов. Такая функция называется «функция И», *конъюнкция* или *логическое умножение*. Обозначением этой функции является $\&$, \wedge или \cdot , так что можно записать:

$$Y_1 = X_1 \& X_2 = X_1 \wedge X_2 = X_1 \cdot X_2.$$

Иногда в конкретном контексте, как и в обычной алгебре, пишут $Y_1 = X_1 X_2$, но понимают это как запись булевой функции.

Функция Y_2 принимает единичное значение, когда хотя бы один из аргументов X_1 и X_2 или оба этих аргумента сразу принимают единичное значение. Она равна нулю лишь тогда, когда оба аргумента X_1 и X_2 принимают нулевое значение. Это соответствует параллельному соединению переключательных элементов. Такая функция называется «функция ИЛИ», *дизъюнкция* или *логическое сложение*. Обозначением этой функции является \vee или $+$, так что можно записать:

$$Y_2 = X_1 \vee X_2 = X_1 + X_2.$$

Логическое сложение, где $1 + 1 = 1$, не следует путать с арифметическим сложением, где $1 + 1 = 2$. Иногда в описаниях переключательных, главным образом цифровых, схем используется функция арифметического сложения, иначе называемая «исключенное ИЛИ», которая принимает единичное значение только тогда, когда лишь один из аргументов: либо X_1 либо X_2 принимает единичное значение. Если же они оба равны 1, то в соответствии с арифметическим равенством $1 + 1 = 2$ (причем обычное 2 в двоичной записи равняется 10), эта функция принимает значение, равное 0, что обозначается знаком \oplus .

Наконец, из этой таблицы можно заключить, что функция Y_3 противоположна аргументу X_1 (принимает единичное значение, когда X_1 равняется нулю и, наоборот, равняется нулю, когда X_1 принимает единичное значение) и не зависит от аргумента X_2 . Тогда говорят, что функция Y_3 есть *инверсия* аргумента X_1 . Это соответствует размыкающему контакту в контактных реле (подробнее см. далее). Инверсия какого-либо дискретного аргумента изображается черточкой, расположенной над этим аргументом:

$$Y_3 = \bar{X}_1.$$

Приведенным аналитическим записям и табличному представлению булевых функций соответствует их графическое отображение, представленное на рис. 8.3. На этом рисунке в точках с координатами X_1 и X_2 , равными (0, 0), (0, 1), (1, 0) и (1, 1), функции Y_1 , Y_2 и Y_3 принимают значения 0 или 1 в соответствии с представленной таблицей состояний.

Как доказывается в булевой алгебре, любая логическая функция может быть выражена через названные выше функции конъюнкции, дизъюнкции и инверсии. Поэтому это сочетание функций принято называть *нормальным базисом*. Из практических наблюдений вытекает также, что любая переключательная схема может быть реализована с помощью различных сочетаний последовательного, параллельного и инвертирующего соединений.

Заметим, что нормальный базис (т. е. три элементарные логические операции) может быть еще уменьшен и сведен к любым двум из этих

операций. Это вытекает из так называемой формулы двойственности, гласящей, что дизъюнкция инверсий равняется инверсии конъюнкций и, наоборот, конъюнкция инверсий равняется инверсии дизъюнкций. В справедливости этой формулы можно убедиться, рассматривая графическую интерпретацию булевых функций, приведенную на рис. 8.3.

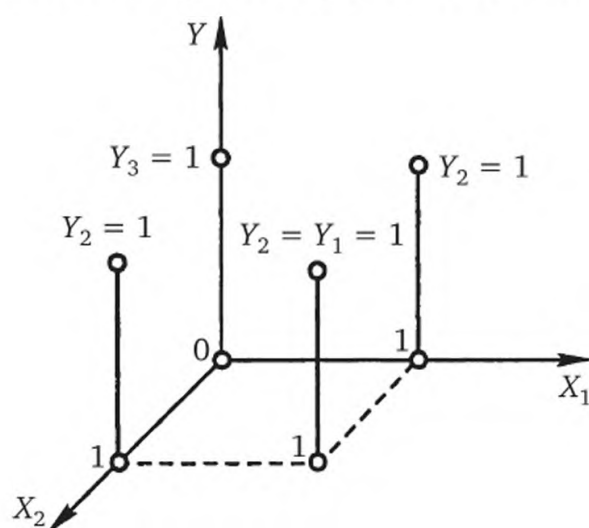


Рис. 8.3. Графическая интерпретация логических функций дискретных аргументов

§ 8.2. Электромагнитные контактные реле

Одним из основных электрических аппаратов, осуществляющих коммутацию в электрических цепях, являются *электромагнитные контактные реле*. Слово «реле» в переводе с французского означает «связь, коммутация». Такое реле по конструкции представляет собой базу (обычно пластину) из электроизоляционного материала (обычно из гетинакса или текстолита), на которой закрепляются катушка-соленоид с втягивающимся в нее стальным сердечником и изолированные друг от друга пары контактов. На штоке сердечника закрепляются изолированные друг от друга траверсы, на которых установлены пары контактов, способные замыкать или размыкать соответствующие контакты, установленные на базовой пластине. Перемещение сердечника, происходящее вследствие подачи напряжения на катушку-соленоид, вызывает замыкание или размыкание с помощью одной пары контактов, установленных на траверсах, до двенадцати пар контактов, установленных на базовой пластине. Это свойство, заключающееся в замыкании или размыкании многих контактов вследствие подачи единственного сигнала на обмотку соответствующего реле, называется *размножением контактов*. Какая именно пара контактов на базовой пластине будет при подаче напряжения на катушку замыкаться, а какая — размыкаться, определяется начальной установкой этих пар с их последующим закреплением. Так устроены и работают широко распространенные в схемах

станочной автоматизации и управления реле типа РП (реле промежуточные). Подобные реле называются промежуточными, потому что они, с одной стороны, не являются датчиками — источниками тех или иных информационных сигналов, а с другой — не воздействуют непосредственно на исполнительные механизмы, а лишь передают на них управляющие воздействия. Задача сетей из таких реле состоит в логической обработке поступающих на них дискретных сигналов от различных датчиков и в выработке дискретных же управляющих сигналов для исполнительных механизмов.

Проектирование конкретной электрической системы управления тем или иным объектом машиностроения начинается с разработки принципиальной электроконтактной схемы. В этой схеме определенным образом увязываются обмотки катушек-соленоидов промежуточных реле и контактные пары этих реле.

Для питания таких реле иногда используется переменный ток напряжением 380 или 220 В, что является удобным, поскольку эти напряжения представляют собой фазные напряжения промышленной сети трехфазного переменного тока. Однако в основном для питания релейно-контактных схем используется постоянный ток напряжением 24 В или гораздо реже 48 В.

Работа на переменном токе означает, что в моменты перехода значений гармонически изменяющегося тока через 0 контакты удерживаются на месте лишь своей инерцией без каких-либо удерживающих сил. Это может привести к так называемому дребезгу контактов. Поэтому релейно-контактные схемы запитывают, как правило, постоянным напряжением, вырабатываемым с помощью выпрямительных мостовых устройств.

Понижение рабочего напряжения до 24 В диктуется требованиями техники безопасности. Другой причиной является то, что для обеспечения надежности контактов надо увеличивать усилие, с которым они замыкаются или размыкаются. Это усилие пропорционально произведению силы тока, протекающего через обмотку реле, на число витков этой обмотки. Но увеличение числа витков обмотки реле ограничивается его габаритами, а чтобы увеличить силу тока при одной и той же мощности, необходимо уменьшить рабочее напряжение обмотки.

Итак, разработать принципиальную релейно-контактную схему — значит определенным образом расположить и увязать между собой обмотки промежуточных реле и их контакты, источник питания и заземление, а также входные сигналы и вырабатываемые схемой управляющие воздействия. Что же является для переключательных схем источниками входных сигналов, куда направляются вырабатываемые этими схемами управляющие воздействия и как обозначаются на принципиальных релейно-контактных схемах обмотки и контакты используемых промежуточных реле?

Обмотки промежуточных реле обозначаются на схемах прямоугольником, расположенным поперек линии связи. Это показано на рис. 8.4, а. Обмотка реле на схеме обозначается буквами РП, при которых ставится порядковый номер данного реле на этой схеме, например РП14.

На этом рисунке обозначены также контакты этого реле РП14: замыкающий (рис. 8.4, б), размыкающий (рис. 8.4, в) и перекидной т. е. такой, при срабатывании которого одна пара контактов замыкается, а другая — размыкается (рис. 8.4, г). Контакты того или иного промежуточного реле предваряются цифрой, обозначающей порядковый номер данной пары контактов в этом реле. Например, обозначение 3КРП14 означает 3-ю пару контактов в промежуточном реле номер 14. Следует заметить, что замыкающий контакт иногда называется «нормально открытым», а размыкающий — «нормально замкнутым». Однако это название применяется реже и является не вполне корректным, так заранее нельзя установить на все случаи, какое состояние для контактов является «нормальным».

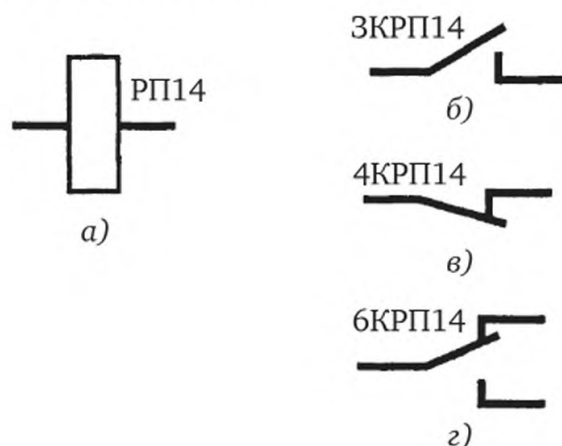


Рис. 8.4. Обозначения на принципиальных релейно-контактных схемах обмоток и контактов промежуточных реле

Источниками дискретных сигналов для релейных электроконтактных переключательных схем могут быть все аппараты с электрическим выходом, помещенные в табл. 8.1. Ограничимся рассмотрением обозначений двух типов кнопок, осуществляющих ручное воздействие, например подачу сигналов «Пуск» и «Стоп», и концевых, или путевых, выключателей, подающих дискретные сигналы под воздействием движения рабочих органов станка. Примеры обозначений приведены на рис. 8.5.

На этих схемах кнопки, на которые непосредственно нажимает оператор, обозначаются КН, а справа при них пишется цифра, которая, как и в предыдущем случае, означает порядковый номер данной кнопки в этой схеме. Кнопки могут быть замыкающими, типа кнопки «Пуск» (рис. 8.5, а), и размыкающими, типа кнопки «Стоп» (рис. 8.5, б). Путевые (более общее название), или концевые выключатели графически изображаются так же, как и кнопки, но сопровождаются надписями ПВ или КВ. Эти надписи также сопровождаются цифрой, которая, как

и в предыдущем случае, означает порядковый номер данного выключателя в этой схеме.

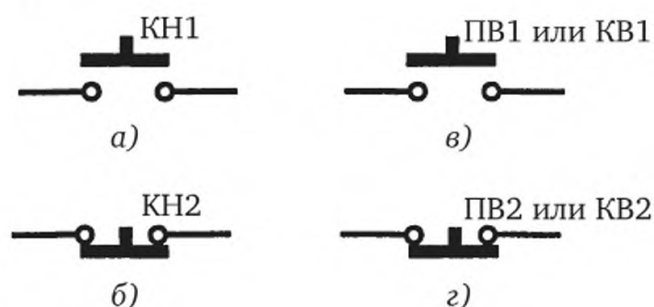


Рис. 8.5. Обозначения кнопок и путевых (концевых) выключателей на принципиальных релейно-контактных схемах

Заметим, что и кнопки, и путевые выключатели могут быть как контактными, так и бесконтактными (о бесконтактных логических элементах см. § 8.3). Кроме того, кнопки могут либо выполнять свою функцию, лишь пока на них воздействует оператор, либо оставаться включенными и после того, как нажатие оператора прекратится. В этом случае говорят о так называемых «западающих» кнопках. Чтобы вернуть кнопку в исходное состояние, нужно нажать на нее во второй раз либо нажать другую, сбрасывающую кнопку. Сохраняют свое состояние после снятия ручного воздействия и устройства, конструктивно отличающиеся от кнопок, такие, как тумблеры и переключатели. Однако механические устройства и защелки, удерживающие кнопки в нажатом состоянии и после снятия усилия нажатия, подвержены износу и являются элементом потенциальной ненадежности. Поэтому сохранение воздействия, произведенного кнопкой, и после снятия усилия нажатия лучше обеспечивать электрическим, схемным путем, что рассматривается ниже. Обратим также внимание на то, что сами кнопки конструктивно могут быть весьма разнообразными, отличаясь главным образом формой и размерами головки, на которую производится нажатие. Такие головки могут быть клавишного типа, рассчитанными на нажатие одним пальцем, а могут быть и так называемого грибкового типа, рассчитанными на нажатие всей ладонью. С головками грибкового типа выполняются все кнопки аварийного останова, ориентированные на быстрое нажатие.

Выходные сигналы релейных переключательных схем могут поступать на все аппараты с электрическим входом, перечисленные в табл. 8.1. Особое место в схемах электроавтоматики занимают так называемые *контакторы*. Контакторами называют электромагнитные аппараты, предназначенные для включения и отключения силовых цепей с током от 10 до нескольких сотен ампер и напряжением до нескольких сотен вольт. Число цепей, которыми управляют контакторы, лежит в пределах от 1 до 5. Кроме главных контактов, служащих для переключения силовых цепей, контакторы обычно снабжаются дополнительными маломощными контактами для самоблокировки и для

работы в дополнительных коммутационных цепях. Контакторы, предназначенные для включения и отключения трехфазных асинхронных электродвигателей, называют *магнитными пускателями*. Для определенности будем рассматривать следующие виды потребителей выходных сигналов электрических переключательных схем:

- обмотки пускателей (контакторов) электрических моторов;
- соленоиды, управляющие гидравлическими и пневматическими золотниками и распределителями;
- сигнальные лампочки и светодиоды.

Соответствующие обозначения приведены на рис. 8.6, а, б, в.

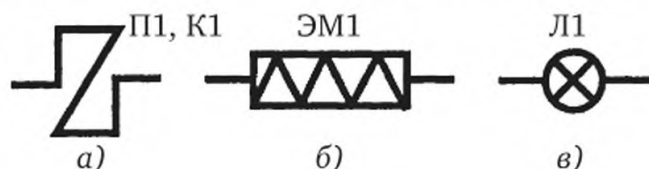


Рис. 8.6. Обозначения потребителей, получающих воздействия от релейных переключательных систем

В релейных переключательных схемах широко используются отработанные типовые решения, реализующие часто встречающиеся функции. Примером таких типовых решений может служить так называемая *постановка на самопитание*. Соответствующая схема показана на рис. 8.7.

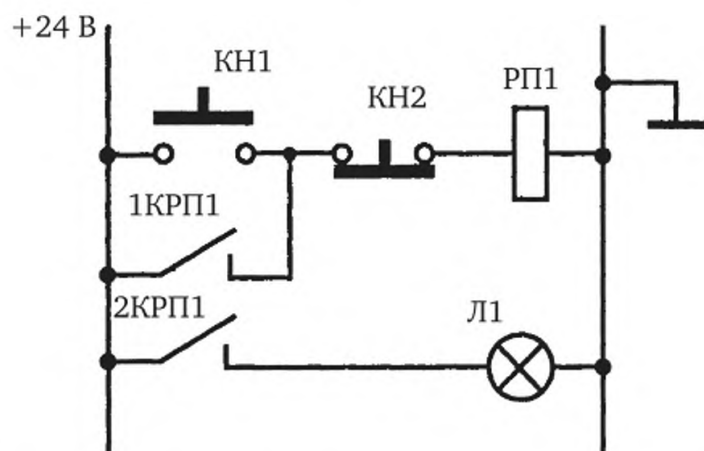


Рис. 8.7. Схема постановки реле на самопитание

Эта схема работает следующим образом. При нажатии кнопки КН1 и при не нажатой кнопке КН2 обмотка реле РП1 оказывается под напряжением +24 В. Реле РП1 срабатывает, и его контакты 1КРП1 шунтируют кнопку КН1. После этого кнопку КН1 можно перестать нажимать — это ничего не изменит в состоянии реле РП1. Другая пара контактов этого же реле, 2КРП1, подаст напряжение на выходное устройство, в данном случае на лампочку Л1. Чтобы погасить лампочку Л1 и вернуть схему в исходное состояние, нужно нажать кнопку КН2.

В схемах электроавтоматики часто используются электромагнитные контактные реле, чувствительные к направлению тока в обмотке.

Такие реле называются *поляризованными*. Поляризация осуществляется за счет магнитного потока смещения, создаваемого постоянным магнитом.

По мощности, необходимой для срабатывания, реле подразделяют на высокочувствительные (до 10 мВт) и слаботочные нормальной чувствительности (до 1...5 Вт). По коммутируемой мощности различают переключательные реле малой мощности (до 50 Вт постоянного или до $120 \text{ В} \cdot \text{А}$ переменного тока), промежуточные (до 150 Вт постоянного тока и $500 \text{ В} \cdot \text{А}$ переменного тока), а также силовые контакторы.

Заметим, что при срабатывании нескольких контактов иногда оказывается небезразличным, какие из них сработают раньше, а какие позже. Сработавшие контакты могут быть «подхвачены» элементами с запоминанием, что изменит ситуацию для элементов, запоздавших со срабатыванием. Вследствие случайного разброса времен срабатывания в одном случае раньше других сработают одни контакты, а в другом — другие. Это приводит к неопределенности в поведении переключательной схемы. Такое явление называется «состязанием контактов».

Для придания определенности поведению переключательной схемы наряду с другими методами применяется введение гарантированных задержек времени на срабатывание и на отпускание тех или иных контактных реле. Существуют различные технические приемы построения электромагнитных контактных реле с задержками на срабатывание и на отпускание. Эти приемы требуют подробного рассмотрения и описываются в специальной литературе.

§ 8.3. Бесконтактные электрические логические элементы

Описанные выше электромагнитные контактные реле позволяют строить практически любые схемы автоматики и управления объектами в машиностроении, но обладают рядом недостатков, обусловленных потенциальной ненадежностью и недостаточной долговечностью контактных пар, вытекающей из их подверженности окислению и другим видам коррозии. Чтобы ограничить влияние этого явления, стараются герметизировать зону контактных пар и заполнять образовавшуюся при этом герметическую полость каким-либо восстанавливающим газом, чаще всего водородом. Однако радикальным решением этой проблемы является использование бесконтактных логических элементов, статическая характеристика которых имеет релейный характер.

Бесконтактные электрические переключательные элементы (элементы так называемой твердотельной логики, в английской терминологии — *solid state logic*) строятся на базе магнитных усилителей с глубокой положительной обратной связью и обмоткой смещения. Под обратной связью понимается такое построение схемы, когда определенная часть сигнала с выхода элемента подается на его вход. При положительной обратной связи сигнал, взятый с выхода элемента, сум-

мируется с сигналом, подаваемым на его вход извне. Положительная обратная связь форсирует протекание переходных процессов, способствуя начавшемуся возрастанию или убыванию сигнала на входе элемента, охваченного ею. Глубокая обратная связь имеет место тогда, когда доля выходного сигнала, возвращаемого на вход элемента, достаточно велика.

Для придания характеристике магнитного усилителя релейного характера требуется, чтобы коэффициент обратной связи, равный отношению числа ампервитков обмотки обратной связи к числу ампервитков выходной обмотки переменного тока, был больше 1:

$$K_{oc} = I_{oc} w_{oc} / I_{\sim} w_{\sim} > 1.$$

Принципиальная схема магнитного усилителя, предназначенного для работы в релейном режиме, приведена на рис. 8.8.

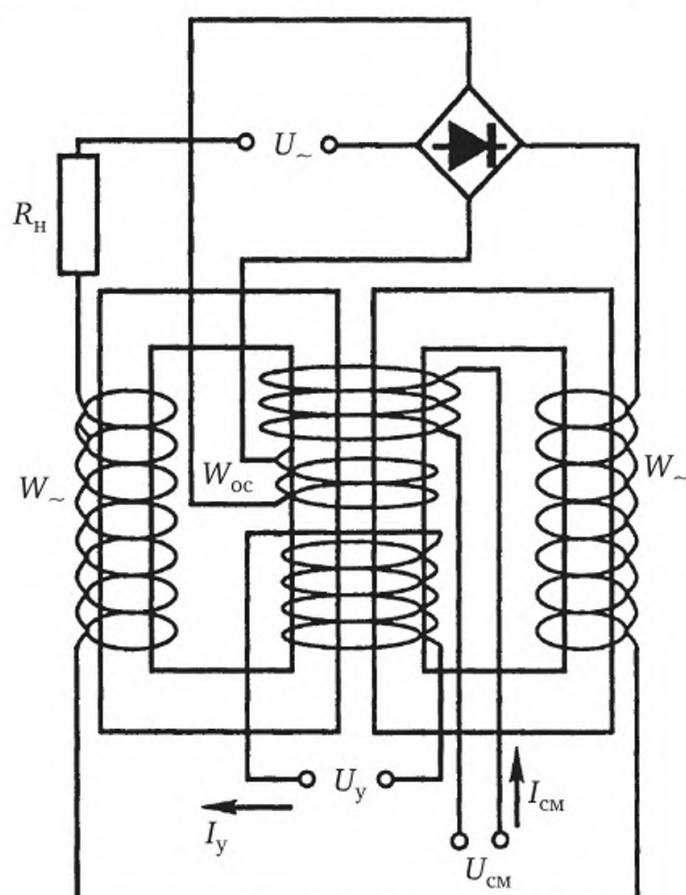


Рис. 8.8. Схема релейного элемента на базе магнитного усилителя

Статическая характеристика такого усилителя, совмещенная с характеристикой обратной связи, приведена на рис. 8.9.

Когда в таком усилителе ток управления отсутствует, т. е. $I_y = 0$, статическая характеристика обратной связи, представляя собой прямую пропорциональную зависимость (прямую линию, проходящую через начало координат), пересекает его статическую характеристику в трех точках: K , M и N . Условию устойчивого равновесия соответствует

только точка K . При увеличении тока управления прямая ОС (характеристика обратной связи) будет смещаться параллельно самой себе до точки B , в которой она лишь касается кривой статической характеристики данного усилителя. Ток в нагрузке, равный $I_{\sim H}$, будет при этом плавно изменяться от $I_{\sim K}$ до $I_{\sim B}$. При дальнейшем увеличении I_y рабочая точка скачком переместится в другое устойчивое положение (за точкой D). Ток в нагрузке при этом также скачком увеличится до значения $I_{\sim D}$. При дальнейшем увеличении тока I_y ток I_{\sim} увеличивается незначительно.

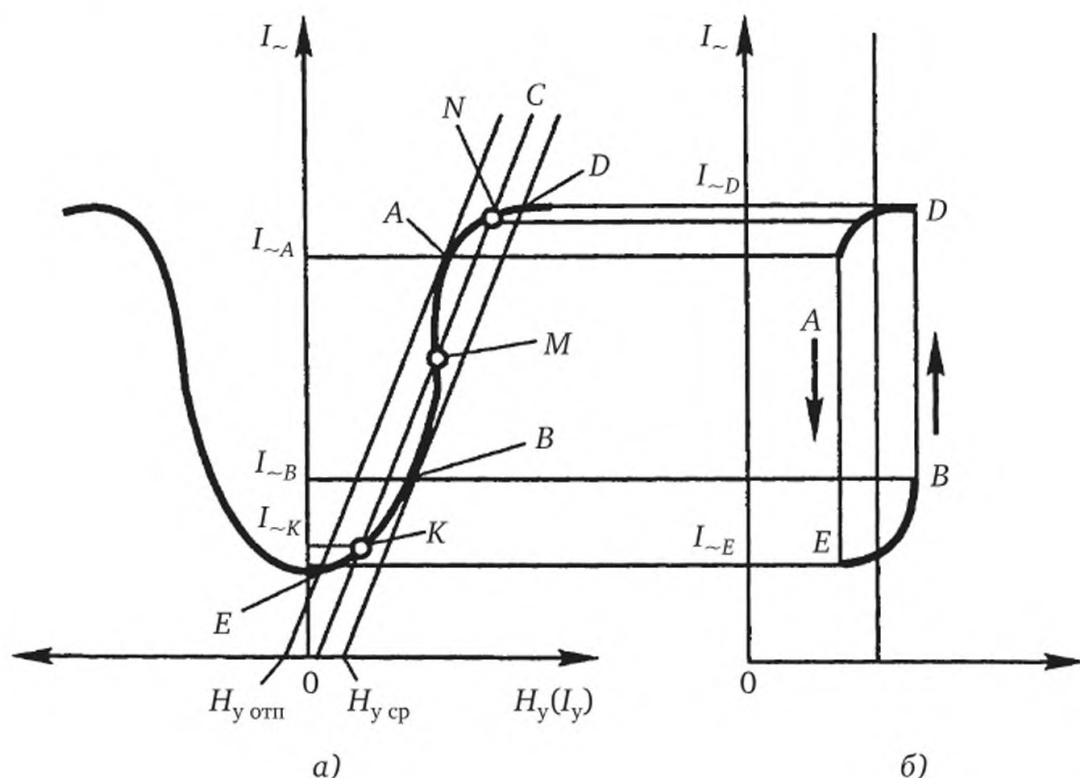


Рис. 8.9. Статические характеристики магнитного усилителя с глубокой обратной связью

При последующем уменьшении тока до нуля ток в нагрузке изменяется мало (реле продолжает находиться во «включенном» состоянии). Если изменить полярность тока управления I_y , то при некотором его значении ток в нагрузке резко уменьшится с величины $I_{\sim a}$ до величины $I_{\sim E}$. Это соответствует отключению реле, и ток управления при этом равен току отпускания. В целом процессы аналогичны происходящим в электромагнитном контактном реле. При подаче определенного смещения путем введения обмотки смещения можно добиться исключения необходимости перехода тока управления в отрицательную область.

На рис. 8.9, а показано исходное построение статических характеристик такого магнитного усилителя вместе с характеристиками обратной связи, а на рис. 8.9, б приведена перестроенная характеристика зависимости тока на выходе такого элемента от тока управления, т. е. его релейная характеристика.

Большое применение нашли так называемые переключательные элементы на кольцевых ферритовых сердечниках, которые имеют широкую и почти прямоугольную петлю гистерезиса.

На рис. 8.10, а представлена схема такого элемента, а на рис. 8.10, б — его статическая характеристика.

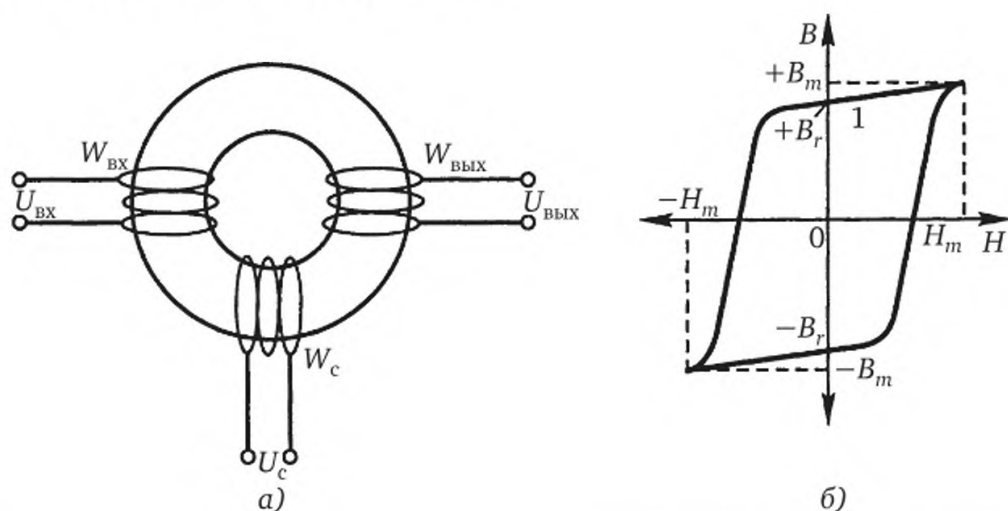


Рис. 8.10. Схема обмоток и статическая характеристика ферритового сердечника

Если по входной обмотке пропустить импульс тока достаточной величины, то после этого даже при прекращении импульса входного тока ферритовый сердечник будет находиться в состоянии 1, что соответствует остаточной магнитной индукции $+B_r$.

При подаче отрицательного импульса U_c на считывающую обмотку W_c произойдет полное перемагничивание сердечника, а после снятия этого импульса сердечник окажется в состоянии 0, что соответствует остаточной магнитной индукции $-B_r$. Во время изменения индукции сердечника от $+B_r$ до $-B_r$ в выходной обмотке $U_{ВЫХ}$ индуцируется ЭДС, которая может быть соответствующим образом зарегистрирована и использована. Если сердечник был в положении 0, то при подаче считывающего импульса на обмотку сердечник останется в этом же состоянии 0. При этом в выходной обмотке появится лишь пренебрежимо малый импульс ЭДС, так как индукция сердечника в пределах от $-B_r$ до $-B_m$ изменяется весьма незначительно. Подавая на считывающую обмотку отрицательный импульс («импульс опроса»), по амплитуде сигнала в выходной обмотке можно определить, в каком состоянии, 0 или 1, находился ферритовый сердечник к моменту подачи считывающего импульса. После подачи считывающего импульса сердечник независимо от его предыдущего состояния оказывается в состоянии 0. Это соответствует считыванию с разрушением информации. Для считывания без разрушения информации применяются специальные схемы, автоматически восстанавливающие считанную информацию.

На таких элементах могут быть построены устройства оперативной памяти дискретных (цифровых) вычислительных машин. В ранних

образцах цифровых машин устройства оперативной памяти и представляли собой буквально матрицы из физических ферритовых сердечников (разумеется, малого диаметра), пронизанные обмотками записи и считывания, направленными по строкам и столбцам матричной памяти. В такой памяти задача адресования к той или иной строке, образованной отдельными ферритовыми сердечниками, изображающими двоичные разряды считываемого или записываемого числа, сводится к выбору того или иного провода, что достигается с помощью соответствующей переключательной схемы. Запоминающую ячейку, т. е. ячейку, сохраняющую свое состояние и после снятия импульса, вызвавшего переход в это состояние, можно реализовать и другими способами, например с помощью электромагнитных контактных реле («схема самопитания»), описанных выше. Такая ячейка может быть реализована и чисто электронными средствами, на основе так называемых триггерных схем (см. далее). Использование технологии напыления для реализации ячеек памяти позволило получить схемы высокой степени интеграции (с большим количеством переключательных элементов в единице объема), что привело к появлению малогабаритных запоминающих устройств большой информационной емкости.

Для решения чисто переключательных задач в свое время большое распространение получили так называемые феррит-транзисторные ячейки (ФТЯ). Схема такой ячейки приведена на рис. 8.11.

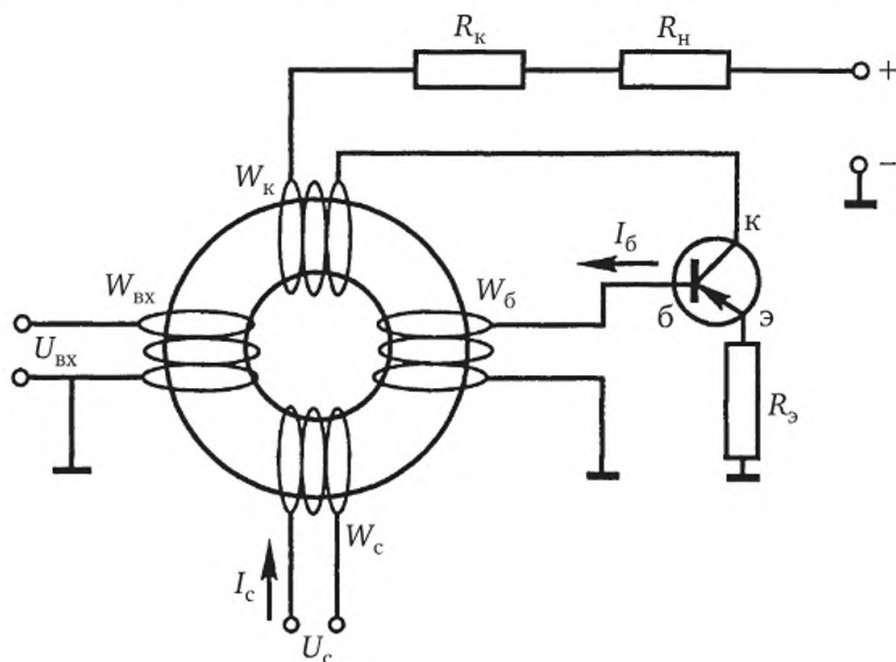


Рис. 8.11. Схема феррит-транзисторной ячейки

На этой схеме — коллекторная обмотка обратной связи. При перемагничивании ферромагнитного кольца в состояние 1 на обмотке базы транзистора возникает положительный импульс, который не оказывает никакого влияния на закрытый транзистор. При поступлении синхронизирующего тактового импульса на базу транзистора подается

отрицательный импульс, транзистор открывается и увеличивается его коллекторный ток, который, проходя по обмотке приводит к увеличению магнитного потока в ферромагнитном кольце, в результате чего отрицательный потенциал на базе триода, в свою очередь, возрастает. Транзистор полностью открывается, его коллекторный ток возрастает, и ферритовый сердечник из состояния 1 переходит в состояние 0. Процесс открывания транзистора происходит лавинообразно. После окончания переходного процесса транзистор снова закрывается.

Если ферритовый сердечник в момент поступления тактового импульса находится в состоянии 0, то он не перемагничивается. Резистор R_k ограничивает ток коллектора, резистор R_n представляет собой нагрузку, а включенный в цепь эмиттера резистор R_z служит для установления режима работы транзистора.

Подобная схема используется для реализации бесконтактных логических переключающих элементов, заменяющих в ряде случаев электромагнитные контактные реле.

§ 8.4. Гидравлические и пневматические релейные элементы

В машиностроении широко распространены гидравлические и пневматические системы автоматизации и управления, в том числе и отдельных, зачастую не полностью автоматизированных станков и стандов. В ряде случаев оказывается целесообразным осуществлять непосредственное изменение направления тех или иных потоков жидкости или газа без организации логических электрических цепей. Тогда можно говорить о гидравлических и пневматических релейных элементах.

Если говорить о гидравлических аппаратах, которые изменяют направление потока рабочей жидкости (масла) в двух или более линиях в зависимости от вида управляющего воздействия, то такие переключающие элементы называются *гидрораспределителями*.

Основными требованиями, предъявляемыми к гидрораспределителям, являются:

- минимум утечек ($100 \dots 300 \text{ см}^3/\text{мин}$ при $p = 20 \text{ МПа}$);
- минимальное переключающее усилие;
- незначительные потери давления ($< 0,2 \text{ МПа}$);
- плавный реверс при ограниченном времени переключения.

По характеру управляющего воздействия, используемого в промышленных гидрораспределителях, они классифицируются, как показано на рис. 8.12.

В механических распределителях поток рабочей жидкости направляется по тому или иному трубопроводу (например, для питания гидроцилиндра либо для слива из него) под воздействием нажатия движущегося рабочего органа станка на соответствующий шток гидрораспределителя.

В ручных гидрораспределителях это нажатие осуществляется оператором. В таких случаях можно говорить о *гидрокнопках*.



Рис. 8.12. Классификация гидрораспределителей

В гидравлически управляемых гидрораспределителях усилие, переводящее этот гидрораспределитель в то или иное возможное положение, осуществляется гидравлическим путем за счет подачи определенного давления в соответствующую рабочую полость. Это давление и требуемый для переключения расход рабочей жидкости регулируются при настройке такого гидрораспределителя.

В электрически управляемых гидрораспределителях усилие, переводящее этот гидрораспределитель в одно из возможных положений, осуществляется электрическим путем за счет применения соответствующих электромагнитов (соленоидов).

Наконец, электрогидравлические гидрораспределители являются двухкаскадными. У них первый каскад является электроуправляемым, и его переключение в другое положение осуществляется электрическим путем. Выход первого каскада является входом второго каскада, переключение которого осуществляется уже гидравлическим путем. Таким способом удастся переключать мощные потоки рабочей жидкости.

В гидросистемах наряду с переключающими элементами, кроме входных и исполнительных устройств, которые требуют отдельного рассмотрения, используются также *гидравлические обратные клапаны*, которые допускают поток рабочей жидкости только в одном направлении, и *гидравлические замки* (управляемые обратные клапаны), которые допускают обратный поток рабочей жидкости лишь при наличии давления в гидравлической системе управления.

Все названные элементы гидросистем изменяют лишь направление потоков рабочей жидкости, не изменяя и не стабилизируя ее давление и расход, что обеспечивается специальными *регулирующими* элементами.

Кроме переключающих и регулирующих элементов в гидравлические системы управления входят также *гидравлические линии*. Принято различать следующие виды гидролиний:

- всасывающие (скорость рабочей жидкости $\leq 1,6$ м/с);
- сливная (скорость рабочей жидкости ~ 2 м/с);

- напорная (скорости рабочей жидкости ~ 2 м/с при давлении 2,5 МПа, $\sim 3,2$ м/с при давлении 6,3 МПа, ~ 4 м/с при давлении 16 МПа и ~ 5 м/с при давлении 32 МПа).

Наряду с трубным (для некоторых типов клапанов) и стыковым присоединением в машиностроении применяются также модульный и башенный монтаж гидроаппаратуры на основе функциональных блоков, а также используются аппараты встраиваемого исполнения.

В гидросистемах также используются такие элементы, как *фильтры* и *аккумуляторы*, а также специальные *средства технической диагностики*.

В пневмоавтоматике к переключающим элементам, которые входят в группу направляющей пневмоаппаратуры, следует отнести различного рода пневмораспределители, обратные пневмоклапаны, клапаны быстрого выхлопа, клапаны выдержки времени, а также логические элементы «ИЛИ» и «И».

В логических пневмосетях используются также кондиционеры сжатого воздуха (фильтры, маслораспылители, глушители) и различного рода пневмолинии. *Пневмораспределители* предназначены для изменения направления или пуска и останова потока сжатого воздуха в двух и более пневмолиниях в зависимости от внешнего воздействия. Классификация пневмораспределителей, используемых в машиностроении, по способу управления и механизму его реализации приведена на рис. 8.13.



Рис. 8.13. Классификация пневмораспределителей по способу и механизму реализации управления

Контрольные вопросы

1. Какая статическая характеристика элемента называется релейной?
2. Какое явление применительно к переключающим элементам называется гистерезисом?

3. Что такое ширина петли гистерезиса у переключающего элемента?
4. Что требуется для возвращения переключающего элемента в исходное состояние, когда петля гистерезиса заходит в отрицательную область аргумента?
5. Что такое насыщение на выходе переключающего элемента?
6. Что такое порог срабатывания переключающего элемента?
7. Что такое порог отпускания переключающего элемента?
8. Какие аргументы называются логическими?
9. Какие функции называются логическими?
10. Что такое функция конъюнкции, чему она соответствует и как изображается?
11. Что такое функция дизъюнкции, чему она соответствует и как изображается?
12. Что такое функция инверсии, чему она соответствует и как изображается?
13. Какова графическая интерпретация логических функций логических аргументов?
14. Что называется нормальным базисом?
15. Что такое формулы двойственности?
16. Как устроено электромагнитное контактное реле?
17. Как обозначается на схемах электромагнитное контактное реле?
18. Сколько пар контактов может быть установлено на одном промежуточном электромагнитном контактном реле?
19. Что такое «размножение контактов»?
20. Что такое замыкающий контакт?
21. Что такое размыкающий контакт?
22. Что такое переключающий контакт?
23. Что является источником дискретных входных воздействий для релейной переключающей схемы?
24. Какие бывают разновидности электрических кнопок, используемых в машиностроении, и как они обозначаются?
25. Что такое путевые (концевые) выключатели, используемые в машиностроении, каковы их разновидности и как они обозначаются?
26. Что такое пускатели (контакторы), для чего они применяются и как обозначаются?
27. Что такое исполнительные электромагниты (соленоиды), для чего они применяются и как обозначаются?
28. Как на принципиальных релейно-контактных схемах обозначаются лампы и светодиоды?
29. Какое напряжение питания наиболее широко применяется в релейно-контактных схемах и чем это объясняется?
30. Что такое поляризованное реле?
31. В чем состоит явление, называемое «состязанием контактов», и какие меры принимаются для исключения нежелательных последствий этого явления?
32. Что такое «постановка на самопитание»?
33. Как работает бесконтактный логический элемент на базе магнитного усилителя?
34. Какой коэффициент обратной связи является необходимым условием для работы магнитного усилителя в переключающем режиме?
35. Как достигается работа бесконтактного переключающего элемента на базе магнитного усилителя в области положительных значений?
36. Как устроен элемент памяти на базе ферритового кольца?
37. Что называется единичным, а что — нулевым состоянием ячейки памяти на базе ферритового кольца?

38. Как происходит считывание информации с элемента памяти на базе ферритового кольца?

39. Что называется считыванием информации с разрушением информации и без разрушения информации?

40. Как устроена феррит-транзисторная ячейка?

41. Как осуществляется положительная обратная связь в феррит-транзисторной ячейке?

42. Какова роль различных резисторов, используемых в феррит-транзисторной ячейке?

43. Что называется гидравлическим распределителем?

44. Какие элементы входят в состав гидравлических логических сетей?

45. Что такое гидравлические обратные клапаны и гидравлические замки?

46. Какие разновидности гидравлических линий употребляются для построения гидравлических логических сетей?

47. Какие варианты управления используются в гидравлических распределителях?

48. Какие разновидности гидравлических распределителей являются двухкаскадными?

49. Для чего применяются двухкаскадные гидравлические распределители?

50. Что называется пневматическим распределителем?

51. Какие элементы входят в состав пневматических логических сетей?

52. Какие разновидности пневматических линий употребляются для построения пневматических логических сетей?

53. Какие варианты управления используются в пневматических распределителях?

54. Какие аппараты используются дополнительно к переключающим для построения пневматических логических сетей?

Глава 9

ТРИГГЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 9.1. Устройство и работа электронного триггера

Триггер — это типовая ячейка, играющая исключительно важную роль при построении различных переключающих схем и схем с памятью, а также различного рода арифметических устройств. Само слово «триггер» в переводе с английского означает «курок», спусковое устройство. Поэтому схемы на триггерах называют также спусковыми схемами.

По существу статический триггер, наиболее широко распространенный в схемах автоматики и управления, представляет собой двухкаскадный усилитель постоянного тока, охваченный глубокой положительной обратной связью. Это значит, что при малейшем изменении входного сигнала, ведущем к увеличению выходного сигнала, величина сигнала, поступающая на вход триггерного устройства за счет обратной связи, возрастет, что приведет к дальнейшему росту выходного сигнала и т. д. Процесс будет продолжаться лавинообразно, пока на выходе триггера не установится единичное значение выходной величины, равное значению насыщения. Если затем выходная величина начнет уменьшаться, то это приведет к ее дальнейшему уменьшению. Этот процесс падения значения выходной величины также будет происходить лавинообразно, пока на выходе не установится нулевое значение выходной величины. Переключение с «1» на «0» и с «0» на «1» осуществляется скачком. Таким образом, триггер характеризуется наличием двух, а не одного, стабильных состояний на выходе. Принципиальная схема простейшего электронного триггера на двух транзисторах приведена на рис. 9.1.

Схема, представленная на рис. 9.1, симметрична с равными попарно сопротивлениями резисторов R_2 и R_5 , R_1 и R_6 , емкостями конденсаторов C_1 и C_2 , одинаковыми транзисторами V_1 и V_4 , а также одинаковыми диодами V_2 и V_3 . Она работает следующим образом. При подаче напряжения питания и при отсутствии входных сигналов триггер установится в одно из устойчивых состояний, причем для каждого реального триггера это состояние будет одним и тем же. Будем считать, что высокий выходной потенциал одной из половин триггера (как говорят, одного плеча триггера), например, когда транзистор V_1 полностью открыт, а транзистор V_4 в то же время полностью закрыт, соответствует 1. Другое устойчивое состояние триггера соответствует 0. Это

происходит потому, что даже при скачкообразном включении напряжения питания коллекторный ток транзисторов V_1 и V_4 не может увеличиться скачком вследствие наличия в схеме емкостей C_1 и C_2 . Нарастание коллекторных токов транзисторов V_1 и V_4 происходит по-разному вследствие естественного разброса параметров используемых в схеме резисторов, емкостей, диодов и транзисторов. В результате для данного триггера коллекторный ток одного из транзисторов будет всегда при включении напряжения питания нарастать быстрее, чем коллекторный ток другого транзистора. Поэтому этот транзистор будет открываться быстрее другого и напряжение на его коллекторе будет падать быстрее, чем напряжение на коллекторе другого транзистора. Коллектор этого «опережающего» транзистора через соответствующий резистор связан с базой другого транзистора. Уменьшение напряжения на коллекторе этого транзистора приводит к уменьшению напряжения на базе другого транзистора, что, в свою очередь, приведет к увеличению напряжения на его коллекторе, дальнейшему увеличению напряжения на базе первого транзистора и увеличению его коллекторного тока и т. д. Этот процесс будет протекать лавинообразно, так что первый транзистор в результате подачи питания полностью откроется, а второй полностью закроется.

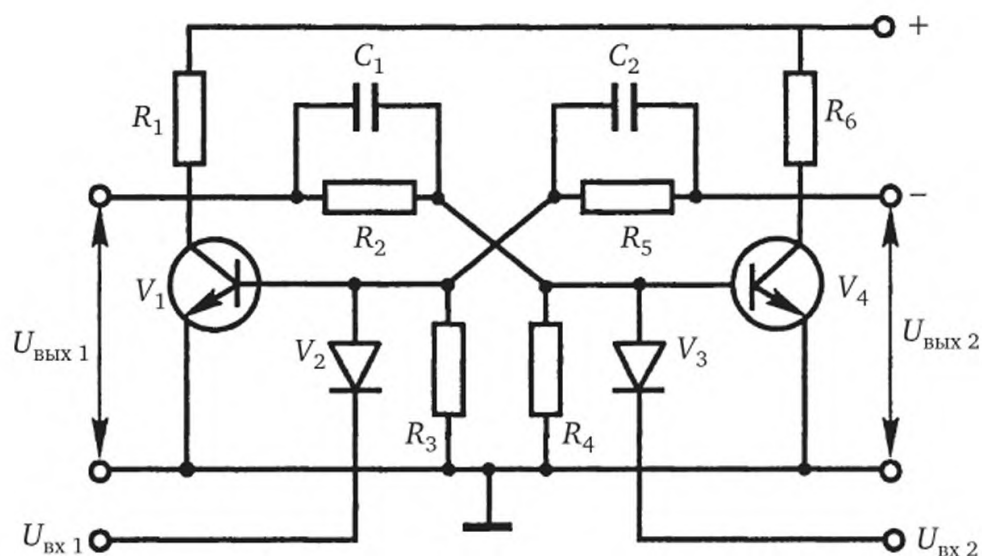


Рис. 9.1. Принципиальная схема простейшего триггера

Для того чтобы изменить состояние триггера, необходимо на вход открытого транзистора подать отрицательный импульс напряжения. Ранее открытый транзистор при этом полностью закроется, а ранее закрытый транзистор — полностью откроется. Это новое состояние триггера также будет устойчивым, так как на базе открытого транзистора вследствие перекрестной обратной связи будет высокое (открывающее) напряжение, а на базе закрытого транзистора — низкое (закрывающее) напряжение.

Такой триггер называется статическим триггером с отдельными входами. Но эти два отдельных входа можно объединить и подавать на общий вход рассматриваемой ячейки импульс через разделительную последовательно включенную электрическую емкость. Электрическая емкость, как известно, представляет собой дифференцирующее звено. Можно исходить и из более простых физических соображений. Электрический конденсатор, по существу представляющий собой два параллельных проводящих листа, разделенных прокладкой из диэлектрика, является полным разрывом для постоянного тока. Однако он способен пропускать через себя переменный ток. При подаче на него прямоугольного импульса можно считать, что изменение этого сигнала происходит только на фронтах этого импульса, а на горизонтальной верхней площадке этого импульса никаких изменений сигнала не происходит. Итак, при подаче прямоугольного сигнала на общий вход триггера через разделительный конденсатор на базы обоих транзисторов поступает отрицательный импульс, соответствующий переднему фронту импульса, и положительный импульс, соответствующий его заднему фронту. Положительный импульс не оказывает никакого влияния на состояния обоих этих транзисторов. Отрицательный же импульс, не меняя состояния открытого транзистора, инициирует процесс отпирания ранее закрытого транзистора. Как мы уже видели, этот процесс, начавшись, приобретает лавинообразный характер, так что ранее закрытый транзистор полностью открывается, а ранее открытый транзистор полностью закрывается. Это представляет собой процесс переключения триггера, или, как говорят, триггер перебрасывается.

Временная диаграмма работы триггера со счетным входом приведена на рис. 9.2. На этой схеме триггер перебрасывается от переднего фронта импульса, подаваемого на общий (счетный) вход. Применяя соответствующее инвертирование, можно добиться, чтобы триггер перебрасывался от заднего фронта входного импульса.

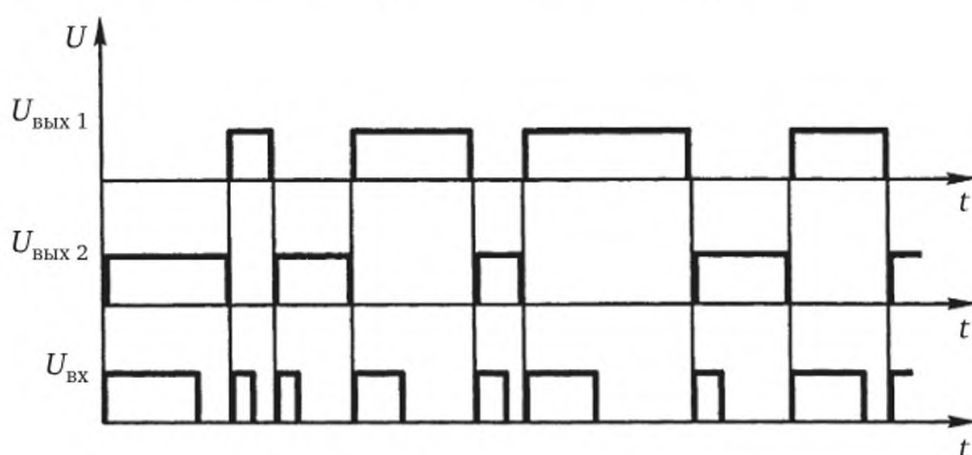


Рис. 9.2. Временная диаграмма работы триггера со счетным входом

Недостатком приведенной простейшей схемы триггера является ее небольшая выходная мощность. Поэтому непосредственно подклю-

чать индицирующее устройство (например, светодиод или неоновую лампу) или какое-либо исполнительное устройство в большинстве случаев оказывается невозможным. Обычно применяют более сложные схемы триггеров, например, с подключением нагрузки через эмиттерный повторитель, что при том же напряжении позволяет получать значительно большие рабочие токи, а следовательно, и использовать на выходе большую полезную мощность.

§ 9.2. Триггерные цепочки

Элементарная ячейка триггера, описанная выше, может использоваться в переключательных схемах различным образом. Распространенным способом использования является построение разнообразных триггерных цепочек, когда выход предыдущего триггера является входом последующего. В этих цепочках используется тот факт, что триггер перебрасывается из одного в другое возможное стабильное состояние только от фронта (переднего или заднего) входного сигнала. Значит, для возникновения и для снятия одного импульса на выходе триггера требуется два фронта на входе, т. е. два входных сигнала. Таким образом, триггер является делителем на два частоты импульсных сигналов, поступающих на его вход. На рис. 9.3 изображена цепочка из последовательно соединенных триггеров с одним счетным входом и двумя взаимно инверсными выходами. Каждый из триггеров, составляющих цепочку, изображен в соответствии с существующими правилами.

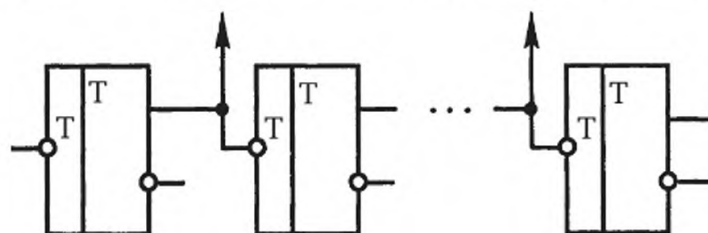


Рис. 9.3. Цепочка из последовательно соединенных триггеров со счетным входом

Если на счетный вход первого триггера подавать серию импульсов (так называемый унитарный код), то на его выходе импульсы будут появляться вдвое реже, располагаясь между передними (задними) фронтами входных импульсов.

Таким образом, в цепочке комбинация триггеров, находящихся в состоянии 1 и 0, будет представлять собой двоичную параллельную запись общего количества импульсов, поступивших на счетный вход первого триггера. Это число может быть считано в результате наблюдения, какие из неоновых лампочек, связанных с напряжениями в плечах триггерных ячеек, светятся, а какие нет. Этот пакет напряжений может быть использован и иным образом в цифровых схемах автоматики и управления.

Например, если на счетный вход первого триггера всего было подано 13 импульсов, то выход первого триггера будет в состоянии 1, на вход второго триггера поступит $13/2 = 6$ (1) импульсов, на вход третьего — $6/2 = 3$ (0) импульса, а на вход четвертого — $3/2 = 1$ (1) импульс. Таким образом, триггеры цепочки окажутся в состоянии 1101, что является двоичной записью числа 13. Заметим, что в описанной схеме двоичное число в параллельном коде записывается слева направо, т. е. крайний левый двоичный разряд является и самым младшим. Это не имеет никакого значения для использования такой схемы.

Совокупность триггеров, предназначенная для хранения информации в виде параллельного двоичного кода, носит название *параллельного регистра*. Пример параллельного регистра, построенного на триггерах с отдельными входами, показан на рис. 9.4.

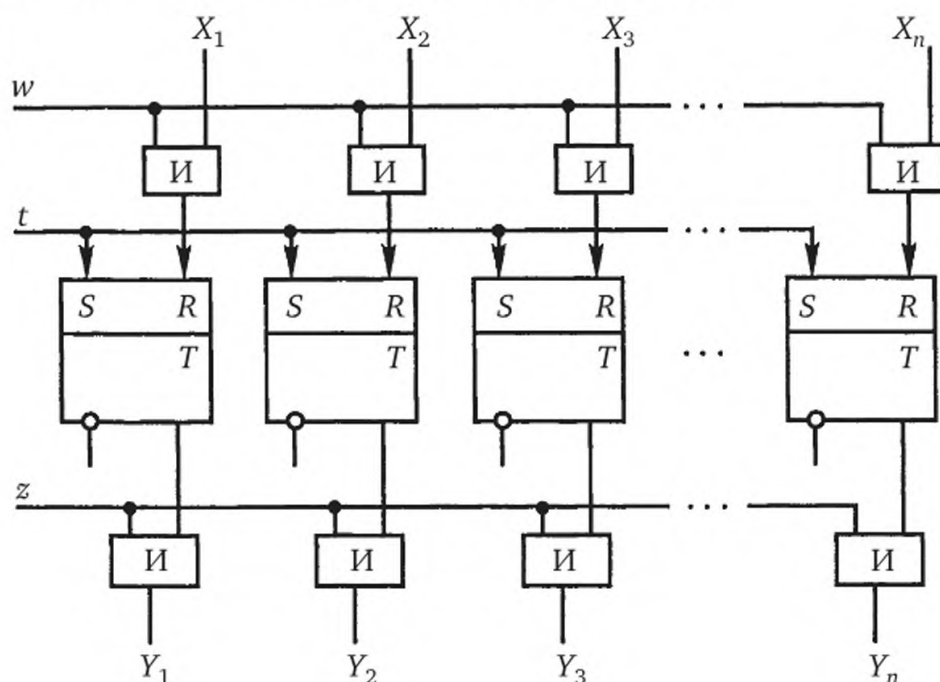


Рис. 9.4. Схема параллельного регистра

Работает приведенная схема следующим образом. Сначала обнуляющий сигнал t устанавливает все триггеры в начальное (нулевое) состояние. Появление сигнала w на разрешающей шине записи открывает все входные вентили (схемы «И») и пропускает значения разрядов X_k на соответствующие входы триггеров. При отсутствии сигнала на шине записи (при $w = 0$) изменения X_k не влияют на состояния триггеров. Число, записанное и сохраненное в виде состояний триггеров, появляется на выходах Y_k в момент появления сигнала считывания (расшифровки) z , открывающего выходные вентили (схемы «И»). Одна строка триггеров может быть использована для записи информации, поступающей из нескольких мест (например, для переписывания чисел из нескольких других регистров), а также для передачи ее нескольким другим устройствам. В этом случае каждый триггер имеет несколько вентилях на входе или на выходе. Если блок, к которому с регистра

направляется выходная информация, имеет запирающиеся входы, то в самом рассматриваемом регистре блокирование считывания производить не нужно, и выходные вентили (схемы «И») могут быть исключены из схемы данного регистра.

Для описанной схемы характерны три такта работы:

- обнуление (очистка памяти);
- запись информации;
- считывание информации.

Иногда, когда формирование обнуляющего сигнала t оказывается затруднительным, применяется так называемая *двухканальная (парафазная)* запись информации. Подобная схема (для одного разряда) приведена на рис. 9.5.

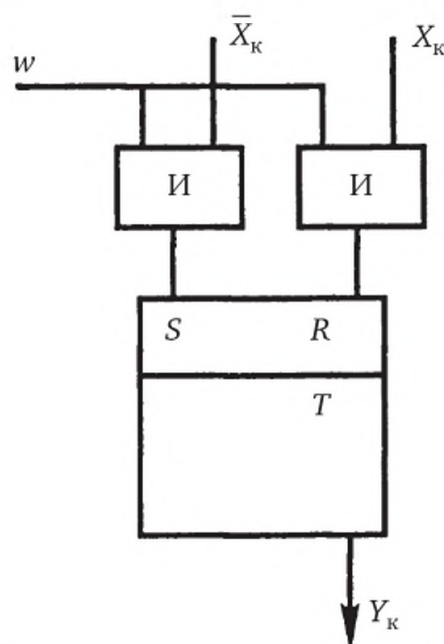


Рис. 9.5. Схема одного разряда параллельного регистра для двухканальной (парафазной) записи

При этом способе записи входы обнуления используются только один раз для общего начального обнуления триггерной цепочки (например, после включения питания). Перед каждым новым вписыванием информации специального обнуления не производится. Информация данного разряда X_k и ее инверсия подаются при открытии входного вентиля записи на два различных входа триггера, устанавливая его в положение, определяемое значением X_k .

В обоих рассмотренных вариантах триггерных регистров число заносится в разряды в момент подачи этого числа на входы регистра. Такие регистры называются *статическими*. Наряду с ними существуют и *динамические* регистры, в которых входное число записывается в момент изменения тактового синхронизирующего сигнала, и это то число, которое соответствует состоянию входов на этот момент. Соответственно разрядными ячейками таких регистров должны являться так называемые *синхронные* триггеры, т. е. такие триггеры,

которые имеют специальный вход для синхронизирующего сигнала и изменяют свое состояние в строго определенные моменты времени, определяемые подачей этого синхронизирующего сигнала. Наиболее распространенным способом реализации такого рода синхронизации является применение специальных *линий задержки* или *элементов задержки* (обычно на один такт подачи синхронизирующего сигнала), обеспечивающих задержку времени запоминания состояния. Противоположностью этому являются используемые в статических регистрах *асинхронные* устройства, примером которых является триггерная схема, рассмотренная в предыдущем параграфе. В асинхронных устройствах изменения внутренних состояний и связанных с ними выходных сигналов вызываются непосредственно изменениями состояний входов. При этом «новое» состояние асинхронной схемы однозначно определяется «старым» ее состоянием и значением информации, подаваемой на вход триггерной схемы в данный момент. Естественно, что длительность подачи сигнала на входы схемы должна быть такой, чтобы схема успела среагировать на нее.

Наряду с рассмотренными параллельными регистрами широко применяются такие типовые триггерные схемы, как *последовательные регистры*, чаще называемые *сдвиговыми*.

Сдвиговым или последовательным регистром (иногда употребляют термин *сдвигающий регистр*) называется цепочка триггеров, соединенных таким образом, что информация с каждого триггера передается соседнему триггерному разряду в отличие от ранее рассмотренного параллельного регистра, где состояние каждого триггерного разряда могло поступать лишь на выход. Разрядные ячейки сдвигового регистра представляют собой синхронные триггеры, переключаемые фронтом тактового сигнала. На рис. 9.6, а приведена принципиальная схема такого устройства, а на рис. 9.6, б — его временная диаграмма.

Сдвигаемая входная информация записывается в последовательном (унитарном) коде через вход X_0 . Регистр предварительно обнуляется общим сбрасывающим сигналом t . Информацию можно также записать в параллельном коде через входы X_1, \dots, X_4 , что аналогично случаю параллельного регистра. В качестве выходов регистра можно использовать выходы триггеров каждого разряда. В этом случае считываемая величина также представляется параллельным двоичным кодом. При подаче тактового сигнала состояние каждого триггера заносится в расположенный справа от него триггер. Таким образом, число, имеющееся в регистре, сдвигается на один разряд вправо.

Существуют такие схемы сдвиговых регистров, в которых можно управлять выходами триггерных разрядов, направляя их в зависимости от тактового сигнала соответствующими вентилями (схемами «И») в соседние разряды, находящиеся либо справа, либо слева от данного триггерного разряда. Такие сдвиговые регистры называются *реверсивными*. Они позволяют сдвигать записанное в них число как вправо, так и влево.

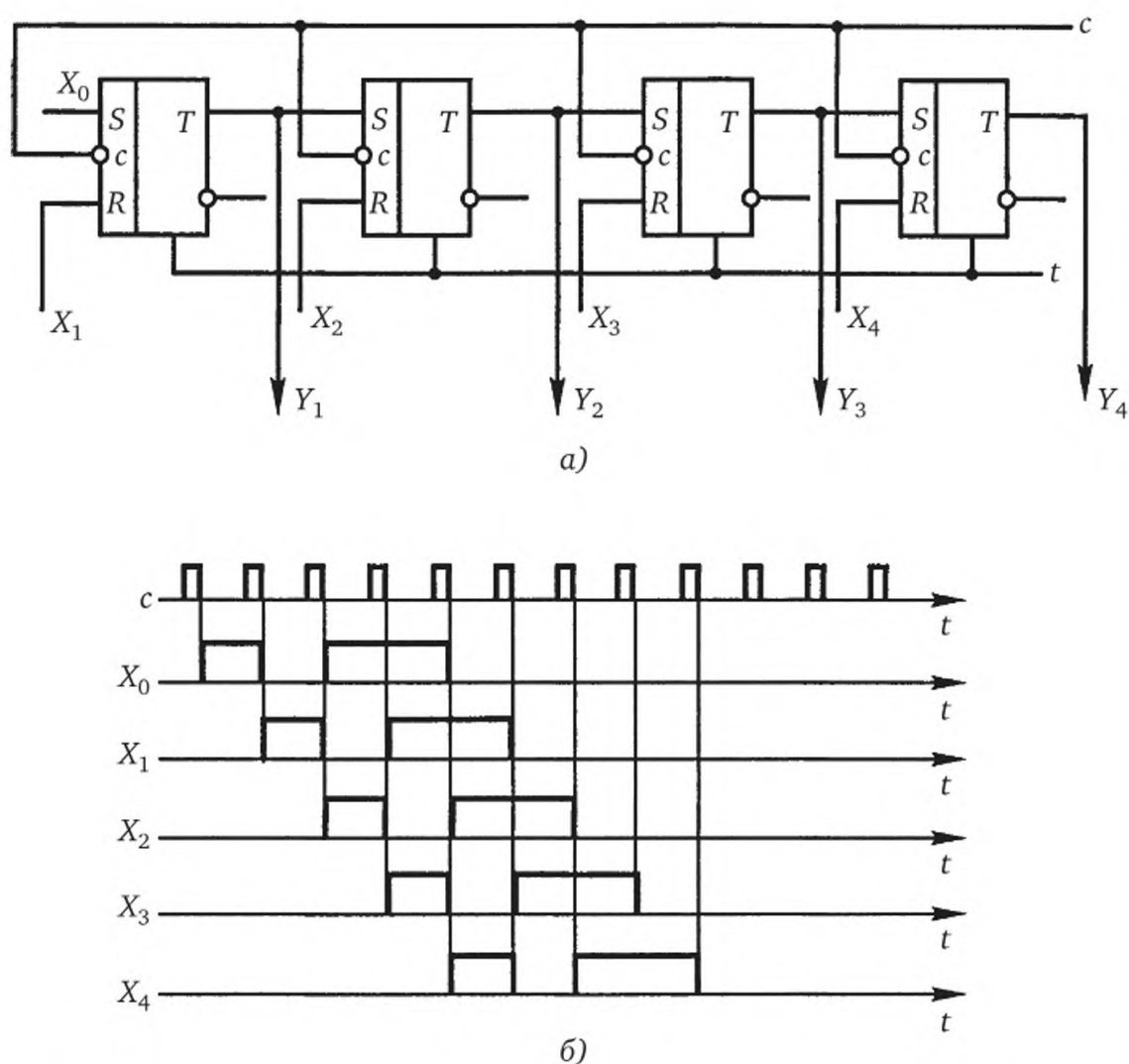


Рис. 9.6. Схема и временная диаграмма работы сдвигового регистра

Заметим, что блокирование тех или иных входов и выходов триггера может осуществляться внутри самой его схемы, и тогда необходимость во внешних вентилях отпадает.

§ 9.3. Двоичные и десятичные пересчетные схемы

Пересчетной схемой или просто счетчиком называется устройство, служащее для подсчета импульсов. Счетчики подразделяются на *параллельные (синхронные)* и *последовательные (асинхронные)*. В параллельных двоичных счетчиках основным элементом каждого разряда является триггер со счетным входом, а общий для всех триггеров синхронизирующий сигнал формируется путем объединения сигналов, соответствующих фронтам входных импульсов всех триггерных разрядов. В последовательных счетчиках элементами каждого разряда являются одинаковые статические триггеры, соединенные так, что выход предыдущего триггера является входом последующего триггера, а выходами всего счетчика являются выходы триггеров каждого раз-

ряда, образующие двоичное число, равное общему числу импульсов, поступивших на вход счетчика.

Такая схема уже рассматривалась в предыдущем параграфе, но к ней требуется некоторое дополнительное пояснение. Дело в том, что эта схема является статической лишь в конечном счете, когда в ней заканчиваются все переходные процессы. Например, изменение содержания счетчика с 3 на 4 должно пройти в такой последовательности: $011 \rightarrow 010 \rightarrow 000 \rightarrow 100$, что видно из реальной временной диаграммы работы счетчика, учитывающей времена работы триггерных разрядов и сопутствующей каждому разряду схемы, которая приведена на рис. 9.7 ($Y_1 = 1, Y_2 = 1, Y_3 = 0 \rightarrow Y_1 = 0, Y_2 = 1, Y_3 = 0 \rightarrow Y_1 = 0, Y_2 = 0, Y_3 = 0 \rightarrow Y_1 = 1, Y_2 = 0, Y_3 = 0$). Заметим тем не менее, что схема, изображенная на рис. 9.7, хотя и учитывает время реакции на фронты импульса, тоже является в известной степени идеализированной, потому что в реальности импульсы на входах и выходах триггеров не могут быть такой идеальной прямоугольной формы, как та, что показана на этом рисунке.

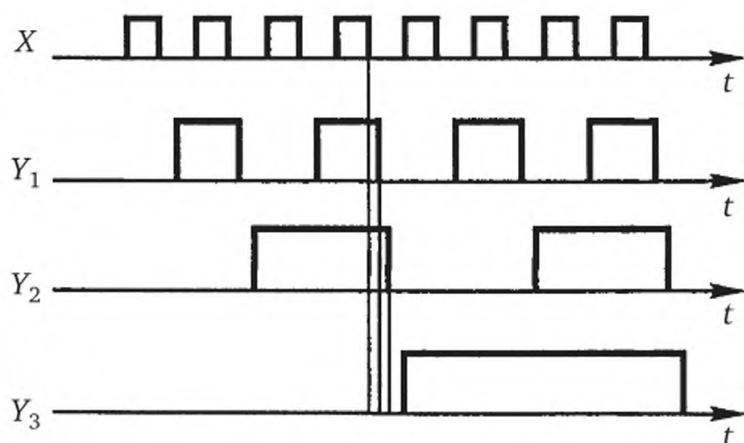


Рис. 9.7. Временная диаграмма последовательного двоичного триггерного счетчика, приближенная к реальности

Поэтому считывание информации с такого простейшего последовательного счетчика во избежание получения неверных данных должно выполняться только после окончания всех переходных процессов. Однако в схемах промышленной автоматики быстродействие электронной схемы обычно не является лимитирующим фактором, и применение такого простейшего счетчика в сочетании с соответствующими блокирующими считывающими схемами оказывается возможным.

Кроме деления счетчиков на параллельные и последовательные существует также их деление на суммирующие и вычитающие.

Суммирующие счетчики считают в прямом направлении, т. е. после получения ими каждого входного импульса записанное в них число увеличивается на 1. Вычитающие счетчики считают в обратном направлении, т. е. после получения ими каждого входного импульса записанное в них число уменьшается на 1. Практически это осуществляется путем

подачи на вход последующего триггера инверсии выхода предыдущего триггера. Сигнал состояния триггера по-прежнему снимается с самого выхода, а не с его инверсии. Так, если в вычитающем счетчике было записано число 011, то после подачи еще одного импульса на его вход в этом счетчике окажется записанным число 010, а не 100, как произошло бы в суммирующем счетчике.

Отдельную группу счетчиков составляют устройства с выходным кодом «1 из n », называемые *кольцевыми счетчиками*.

Простейшим примером такого рода является сдвиговый регистр, подобный рассмотренным выше. Если в одном разряде он содержит 1, а в остальных — 0, то после подачи каждого входного импульса эта 1 будет сдвигаться к следующему триггеру. Путем соединения выхода триггера последнего разряда с входом первого можно получить «кольцо». Тогда n -разрядный закольцованный регистр считает «по модулю n ». Соединение последнего разряда с первым может и не иметь места, но тогда перед каждым циклом счета нужно устанавливать триггеры каждого разряда в начальное положение. Это в некоторой степени усложняет схему, но таким образом не сохраняются, а, наоборот, устраняются случайно возникшие ошибки. Например, через один цикл счета устраняется появление двух единиц в каких-либо разрядах.

При использовании натурального двоичного кода емкость счетчика является вполне определенной величиной и равняется двойке, возведенной в степень, равную числу разрядов этого счетчика. Между тем зачастую необходимо осуществлять счет по модулю, не являющемуся целой степенью двойки, например по модулю 5. В этом случае говорят об устройствах с *вынужденным скачком в коде* (*укороченных устройствах*). Иначе такие устройства называются счетчиками с «принудительным насчетом». В счетных устройствах, использующих естественный двоичный код, число в параллельном коде, изображающее скачок, обычно вводится в младшие разряды, когда выход триггера в старшем разряде равен 1, а триггеры всех остальных разрядов находятся в состоянии 0. Передний фронт импульса, возникающий при переключении триггера старшего разряда с 0 на 1, используется для установки в состояние 1 триггеров тех разрядов, сочетание которых с триггерами других разрядов, оставшихся в нулевом состоянии, изображает заданную величину скачка.

На рис. 9.8 изображена схема последовательного счетчика до 5, реализованного на статических триггерах со счетным входом.

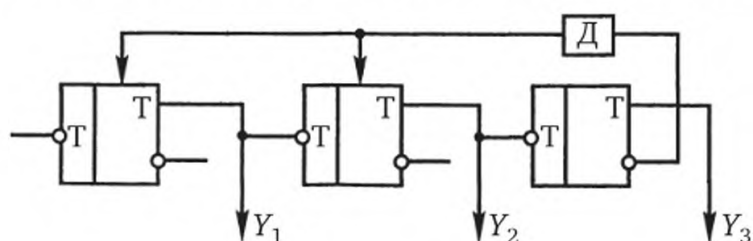


Рис. 9.8. Схема последовательного счетчика до 5

Емкость трех разрядов последовательного двоичного счетчика составляет 8 импульсов. Для счета до 5 величина скачка должна составлять 3 или в двоичном коде 11. Элемент, обозначенный на этом рисунке буквой «Д», выполняет функцию формирования короткого импульса, положительного или отрицательного, в ответ на появление или соответственно на исчезновение на его входе статического сигнала, т. е. выполняет функцию дифференцирования. Таким элементом может быть, например, электрический конденсатор, включенный последовательно. Два канала, показанные на рис. 9.8, служат для установки двух младших разрядов счетчика в единичное положение при исчезновении сигнала (по заднему фронту этого сигнала) на инверсном выходе триггера старшего разряда.

Особое значение в схемах автоматики и управления имеют счетчики емкостью 10. Они называются *десятичными* или *декадными*.

Схема последовательного суммирующего десятичного счетчика на статических триггерах, работающего в двоичном коде 8421, приведена на рис. 9.9. В этом счетчике между триггерами 1-го и 2-го разрядов включается элемент конъюнкции, входами которого являются инверсный выход триггера 1-го разряда и выход последнего, 4-го, разряда (он же является выходом Y_4 самого старшего разряда этой декады десятичного счетчика). Выход этого элемента конъюнкции подается на счетный вход триггера 2-го разряда данной декады.

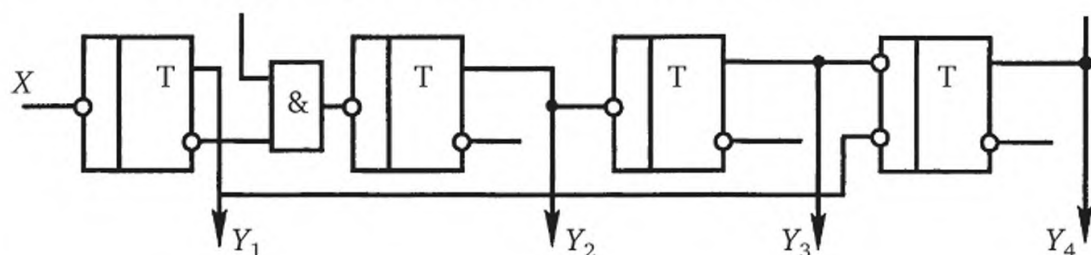


Рис. 9.9. Схема последовательного суммирующего десятичного счетчика на статических триггерах

На статических триггерах можно также построить последовательный *вычитающий десятичный* счетчик, работающий в двоичном коде 8421.

Декады последовательного кольцевого суммирующего десятичного счетчика можно соединять между собой так, чтобы выход старшего разряда предыдущей декады был входом младшего разряда последующей декады. В этом случае в нескольких декадах, связанных между собой таким образом, окажется записанным десятичное число, изображающее общее количество импульсов, поступивших на счетный вход младшего разряда первой декады.

Используя схемы суммирующего и вычитающего счетчиков, можно получить так называемый *реверсивный* счетчик, т. е. счетчик, способный работать в обоих этих режимах. В каком именно из этих режимов будет работать в данный момент тот или иной реверсивный счетчик, определяется в разных счетчиках двояким образом. В одном случае

счетчик имеет один счетный вход и два входа, сигналы на которых определяют, будет ли выполняться режим суммирования или же режим вычитания. В другом варианте счетчик имеет два счетных входа — для суммирования и для вычитания импульсов.

§ 9.4. Схемы счета до заданного числа

Выше было показано, как можно строить счетчики, емкость которых задана и оказывается меньшей, чем число его двоичных разрядов. Соответствующий скачок числа, записанного в счетчике, может быть постоянным, определяемым схемными соединениями данного счетчика, а может быть и переменным, если речь идет о счетчике с параллельным вводом. Однако на практике бывает необходимо сравнивать два непрерывно изменяющихся числа, изображаемых параллельными кодами. Такова, например, задача числового программного управления координатными перемещениями, когда необходимо сравнивать число, изображающее заданное перемещение какого-либо органа станка, с числом, отражающим с необходимой точностью фактическое перемещение этого органа. Такое сопоставление выполняется устройствами, называемыми цифровыми блоками сравнения или компараторами.

Устройства, осуществляющие сравнение двух чисел A и B , имеют следующие три разновидности:

- установление соотношения $A = B$ или $A \neq B$;
- установление соотношения $A \geq B$ или $A < B$;
- установление соотношения $A > B$, $A = B$ или $A < B$.

Первый тип компаратора представляет собой так называемую комбинационную схему, поразрядно проверяющую условия логической равнозначности. Комбинационной эту схему можно назвать потому, что ее выходное дискретное значение однозначно определяется комбинацией состояния ее входов в момент сравнения. Два числа, A и B , будут, равны между собой только в том случае, когда все их разряды между собой совпадают. Поэтому для выработки сигнала об общем равенстве сравниваемых чисел достаточно выработать сигналы о совпадении (равнозначности) для каждой пары разрядов и осуществить конъюнкцию этих сигналов поразрядного совпадения. Поразрядное совпадение сравниваемых чисел A и B означает, что у обоих чисел оба значения данного k -го разряда равны между собой, т. е. $a_k = b_k = 0$ или же $a_k = b_k = 1$. Это есть не что иное, как инверсия арифметического сложения или сложения по модулю 2.

Второй тип компаратора является частным случаем третьего типа.

Третий тип компаратора реализует такую методику, при которой результаты сравнения в разрядах, имеющих больший вес, т. е. в старших разрядах, делают ненужным дальнейшее сравнение в младших разрядах, поскольку результат сравнения чисел A и B уже предрешен.

Принципиально компараторы можно строить двумя способами:

- параллельным, когда оба сравниваемых числа вводятся в компаратор полностью и операция сравнения внутри компаратора производится над обоими числами целиком;

- последовательным, когда сравниваемые числа вводятся в компаратор поразрядно попарно, начиная со старшего либо с младшего разряда.

Параллельный компаратор реализуется из одинаковых поразрядных ячеек без запоминания результатов сравнения каждого разряда. Это, однако, не исключает запоминания общего результата сравнения двух чисел в целом, но это делается уже вне компаратора.

В принципе для представления трех результатов сравнения двух чисел A и B достаточно (причем с избытком) и двух шин Y_1 и Y_2 . Например, если $A > B$, то $Y_1 Y_2 = 10$; если $A < B$, то $Y_1 Y_2 = 01$ и, наконец, если $A = B$, то $Y_1 Y_2 = 00$ или $Y_1 Y_2 = 11$. Однако на практике при построении различных схем автоматики, например следящих координатных или других подобных приводов, оказывается удобным иметь три выхода компаратора: Y_1 , Y_2 и Y_3 . Если $A > B$, то $Y_1 = 1$, $Y_2 = 0$ и $Y_3 = 0$; если $A < B$, то $Y_1 = 0$, $Y_2 = 0$ и $Y_3 = 1$; наконец, если $A = B$, то $Y_1 = Y_3 = 0$ и $Y_2 = 1$. Такие выходы по трем шинам удобно использовать для релейного отключения исполнительного сервопривода в случае равенства A и B и для включения этого сервопривода на полную скорость в прямом или обратном направлении в зависимости от того, $A > B$ или, наоборот, $B > A$.

В каждом k -м разряде можно считать, что

$$y_{1,k} = a_k \bar{b}_k + (a_k b_k + \bar{a}_k \bar{b}_k) y_{1,(k-1)}.$$

Это выражение следует понимать таким образом, что выход $y_{1,k}$ данного, k -го, разряда будет равен 1, если в данном разряде $a_k = 1$, а $b_k = 0$, либо, если $a_k = b_k$, будь то $a_k = b_k = 1$ или $a_k = b_k = 0$, он будет равен выходу $y_{1,k-1}$ предыдущего младшего разряда, т. е. $y_{1,k} = y_{1,(k-1)}$.

Аналогично (симметрично) можно записать:

$$y_{3,k} = \bar{a}_k b_k + (a_k b_k + \bar{a}_k \bar{b}_k) y_{3,(k-1)}.$$

Соответственно

$$y_{2,k} = a_k b_k + \bar{a}_k \bar{b}_k,$$

т. е. выход $y_{2,k}$ данного, k -го разряда будет равен 1 только, если в данном разряде $a_k = b_k$, будь то $a_k = b_k = 1$ или $a_k = b_k = 0$. Если $a_k \neq b_k$, то либо $y_{1,k}$, либо $y_{3,k}$ будут равны 1, а $y_{2,k}$ будет равен 0.

Структурная схема такой ячейки поразрядного сравнения приведена на рис. 9.10.

На этой схеме прямоугольником со значком V обозначен элемент дизъюнкции на два входа (элемент «ИЛИ»), прямоугольником со значком $\&$ обозначен элемент конъюнкции на два входа (элемент «И»), а прямоугольником с кружочком на выходе обозначен инвертирующий

элемент. Нетрудно убедиться, что изображенная на рис. 9.10 структурная схема соответствует логическим соотношениям, приведенным выше.

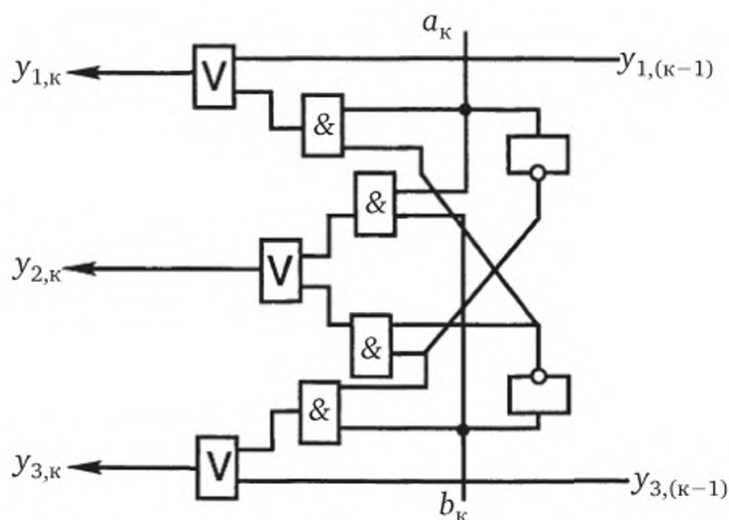


Рис. 9.10. Структурная схема ячейки компаратора

Контрольные вопросы

1. Что называется триггером?
2. Сколько устойчивых состояний имеет статический триггер?
3. Что называется плечом триггера?
4. Что собой представляет электронная схема триггера с раздельными входами?
5. Что собой представляет электронная схема триггера со счетным входом?
6. За счет чего обеспечивается лавинообразный характер переключения триггера?
7. Что называется фронтом импульса?
8. Почему триггер реагирует только на фронты входных импульсов?
9. Какие схемы называются синхронными, а какие — асинхронными?
10. Сколько входных импульсов необходимо, чтобы переключить триггер из одного стабильного состояния в другое?
11. Сколько входных импульсов необходимо, чтобы вернуть триггер в исходное состояние?
12. Что является основным недостатком простейшей электронной схемы триггера?
13. Почему триггер является делителем частоты?
14. Почему цепочка из триггеров может быть использована для перевода числа из последовательного кода в параллельный код?
15. Что такое неоднозначность отсчета в цепочке триггеров?
16. Что может явиться примером неоднозначности отсчета в цепочке преобразования последовательного кода в параллельный код?
17. Что называется регистром?
18. Что такое регистры с последовательным вводом и регистры с параллельным вводом?
19. Что называется сдвиговым регистром?

20. Что такое статические и что такое динамические сдвиговые регистры?
21. Как устроены регистры, сдвигающие число вправо?
22. Как устроены регистры, сдвигающие число влево?
23. Как устроены реверсивные регистры?
24. Как устроены двоичные суммирующие счетчики?
25. Как устроены двоичные вычитающие счетчики?
26. Как устроены двоичные реверсивные счетчики?
27. Какие существуют принципиальные разновидности двоичных реверсивных счетчиков?
28. Как устроен кольцевой счетчик?
29. Какие существуют принципиальные подходы к реализации кольцевых счетчиков?
30. Каковы возможности исправления случайных ошибок в работе кольцевых счетчиков?
31. Что такое «укороченный» двоичный счетчик?
32. Что такое «скачок» кода в укороченных двоичных счетчиках?
33. Как устроен десятичный счетчик?
34. Что называется декадой десятичного счетчика?
35. Какова должна быть связь между декадами десятичного счетчика?
36. Как можно реализовать реверсивный десятичный счетчик?
37. Что такое счет до заданного числа?
38. Что в цифровой технике называется компаратором?
39. Какие основные задачи решаются при построении цифровых компараторов?
40. Для чего в следящих программируемых приводах перемещений применяется цифровой компаратор?
41. Как устроен и работает параллельный компаратор?
42. Как устроен и работает последовательный компаратор?
43. Каким образом результат сравнения, полученный в старших разрядах, определяет использование результатов сравнения в младших разрядах?
44. Какие основные логические соотношения могут определять работу одного разряда цифрового компаратора?
45. Какая структурная схема компаратора реализует описывающие его логические соотношения?

Глава 10

ВВОД И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В СХЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНООБРАБОТКОЙ

§ 10.1. Схемы включения измерительных датчиков в цепи измерения и управления

Датчики, измеряющие тем или иным способом параметры различных процессов производства или исследований, описывались в предыдущем разделе. Как правило, эти датчики выдают выходные сигналы, несущие информацию о ходе контролируемого процесса, в виде той или иной электрической величины. Чтобы воспринимать эти сигналы для целей измерения и сравнения или для воздействия на последующие элементы автоматической системы, необходимо использовать соответствующие схемы ввода. Входной величиной схем такого рода обычно является изменяемое активное, реактивное или комплексное сопротивление (для параметрических датчиков) или электрическое напряжение (для генераторных датчиков).

Среди большого разнообразия входных схем наибольшее распространение получили типовые схемы: *мостовая, дифференциальная и компенсационная.*

Мостовая схема обычно применяется для подключения датчиков, у которых изменение измеряемого параметра преобразуется в изменение активного, реактивного или комплексного сопротивления. Поэтому мостовые схемы могут быть реализованы как на постоянном, так и на переменном токе. Каждый из этих видов измерительных мостов может быть либо *равновесным (балансным)*, либо *неравновесным (небалансным)*.

Принципиальная схема неравновесного моста приведена на рис. 10.1. В таком измерительном мосте в три из четырех плеч включаются неизменяемые сопротивления Z_1 , Z_3 и Z_4 . Четвертым плечом моста является изменяющееся сопротивление датчика Z_d . Условие равновесия моста заключается в том, что произведения сопротивлений противоположных плеч моста должны быть равны. При изменении сопротивления датчика Z_d это условие нарушается, и через измерительный прибор ИП, включенный в измерительную диагональ моста, начинает протекать

некоторый ток. По величине этого тока можно судить о комплексном сопротивлении используемого параметрического датчика, являющемся его выходной величиной.

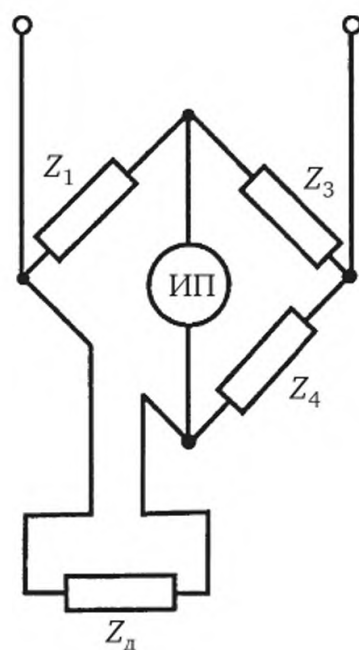


Рис. 10.1. Принципиальная схема неравновесного измерительного моста

Другой разновидностью измерительного моста является равновесная или балансная схема, которая приведена на рис. 10.2.

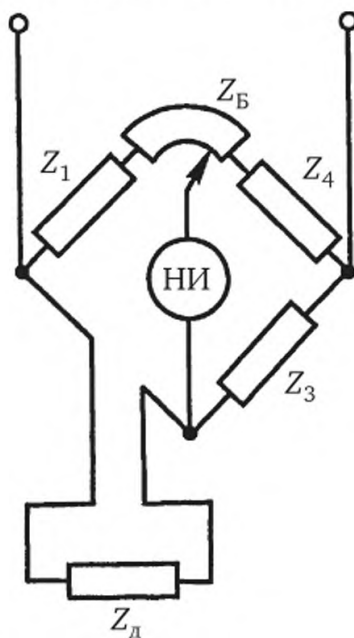


Рис. 10.2. Принципиальная схема равновесного измерительного моста

В такой схеме изменение сопротивления датчика Z_d уравновешивается изменением сопротивлений Z_1 и Z_4 в соседних плечах измерительного моста за счет перемещения движка балансирующего резистора Z_b . Ток через прибор, включенный в измерительную диагональ

моста, при этом не измеряется. Регистрируется лишь факт, что этот ток равен 0, значит, мост уравновешен, и дальнейшее перемещение движка по балансирующему реостату Z_B следует прекратить. Прибор, включенный в измерительную диагональ моста, в данном случае является лишь нуль-индикатором (НИ). В качестве нуль-индикаторов обычно применяются микроамперметры или гальванометры. Выходной же величиной такой измерительной схемы является величина перемещения движка по балансирующему сопротивлению.

Дифференциальные схемы, как правило, работают на переменном токе. Практическое использование таких измерительных схем уже описывалось в предыдущем разделе. Вообще дифференциальной схемой называют электрическую цепь, состоящую из двух контуров, каждый из которых содержит собственный источник ЭДС, причем токи, порождаемые этими ЭДС, направлены навстречу друг другу. Измерительный прибор включается в ветвь цепи, общую для обоих контуров. Он реагирует на разность токов от этих источников ЭДС. Когда сигнала от датчика нет, эти ЭДС и сопротивления контуров полностью симметричны, и ток через измерительный прибор равен нулю.

В принципе можно либо менять сопротивления одного или обоих контуров при неизменных ЭДС этих контуров, либо менять одну или обе ЭДС этих контуров при неизменных сопротивлениях обоих контуров. Выбор того или иного режима работы дифференциальной схемы определяется типом используемого датчика. Например, при использовании индуктивных датчиков они могут быть включены в один, а чаще в оба измерительных контура, что соответствует тому режиму, когда изменяется ЭДС контуров.

Дифференциальные схемы применяют при необходимости сравнения двух величин и установления факта их несовпадения или для определения знака разности двух величин. Они также применяются тогда, когда требуется не определять абсолютное значение контролируемой величины, а следить за ее движением в некотором диапазоне.

По сравнению с мостовой дифференциальная схема имеет большую чувствительность.

Компенсационная схема применяется тогда, когда необходимо с высокой точностью измерить изменение малых ЭДС, например, создаваемых генераторными датчиками, или отреагировать на это изменение.

Идея принципа компенсации состоит в том, что измеряемая ЭДС уравнивается (компенсируется) равным и противоположным по знаку напряжением, значение которого может быть определено с большой точностью. В простейшей компенсационной схеме компенсирующее напряжение подбирается с помощью потенциометра таким образом, чтобы уловить равенство нулю тока, протекающего через нуль-индикатор.

Подбор этого напряжения может производиться вручную или автоматически, как это делается в так называемых *автоматических потенциометрах*, иногда так и называемых *автоматическими компенсаторами*.

Схема автоматического компенсатора, предназначенного для измерения выходного сигнала такого генераторного датчика как термопары, приведена на рис. 10.3. Схема работает следующим образом. Термо-ЭДС E_1 , снимаемая с термопары, компенсируется напряжением, снимаемым с диагонали измерительного моста постоянного тока между движком реохорда (измерительного потенциометра) R_B и вершиной измерительного моста, обозначенной на рис. 10.3 как б. Другая диагональ этого моста запитывается от стабилизированного источника постоянного тока. В одно из плеч измерительного моста включен терморезистор R_4 (обычно он изготавливается из меди или никеля, тогда как остальные три резистора моста изготавливаются из манганина, который обладает малым температурным коэффициентом). Терморезистор расположен вблизи свободных концов термопары T_1 , и осуществляет температурную компенсацию.

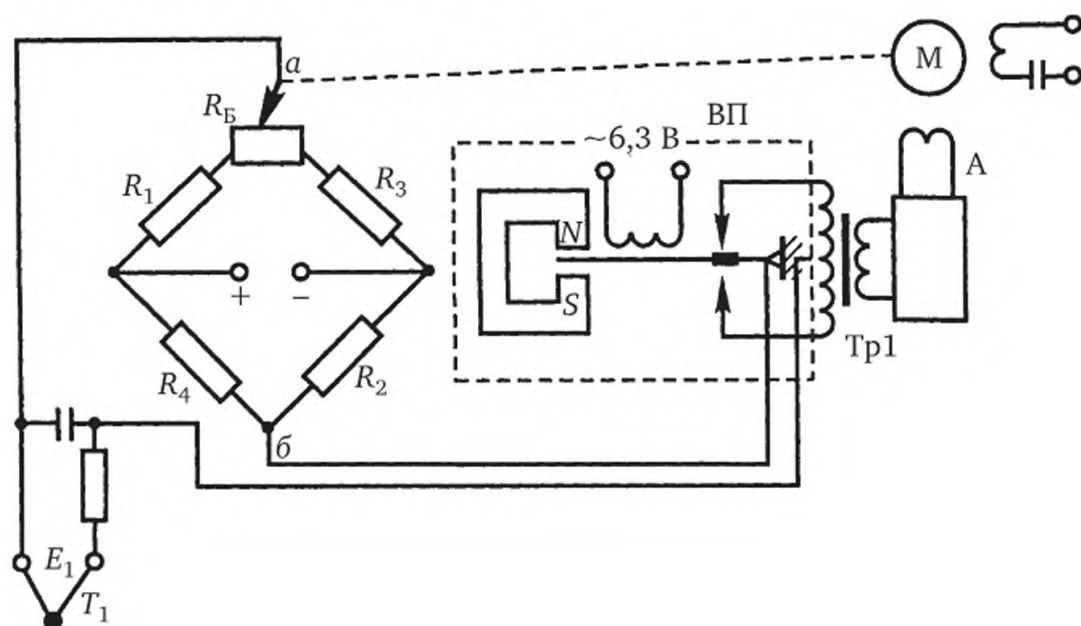


Рис. 10.3. Схема автоматического компенсатора

В процессе измерения поступающая с датчика величина E_1 сравнивается с компенсирующим напряжением. Если они не равны между собой, то возникшее отличное от нуля напряжение дисбаланса преобразуется в вибропреобразователе ВП в напряжение переменного тока и через трансформатор $Tr1$ подается на усилитель А, выходы которого запитывают реверсивный электродвигатель М. Этот двигатель кинематически связан с движком балансирующего реохорда R_B , включенного в соседние плечи измерительного моста. Электродвигатель М перемещает движок балансирующего реохорда R_B в таком направлении, чтобы свести к нулю напряжение дисбаланса измерительного моста. Только в этом случае электродвигатель М будет находиться в покое.

Преобразование постоянного напряжения дисбаланса в переменное необходимо не только для того, чтобы, используя трансформатор $Tr1$, согласовать это напряжение со входом усилителя А, но и для того,

чтобы избежать «дрейфа нуля». Это явление, характерное для всех аналоговых схем постоянного тока, заключается в появлении (изменении) выходного сигнала при неизменном входном сигнале.

Вибропреобразователь состоит из шарнирно закрепленного якоря, постоянного магнита с полюсами N и S и обмотки возбуждения, питаваемой обычно переменным током промышленной частоты (для России стандартная промышленная частота составляет 50 Гц). Переменное магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения, взаимодействует с полем постоянного магнита и заставляет якорь вибрировать с промышленной частотой. В процессе вибрации якорь замыкает то одну, то другую пару неподвижно установленных контактов и поочередно включает в диагональ измерительного моста то одну, то другую половину входной обмотки трансформатора $Tr1$ (на рис. 10.3 этой диагонали соответствует напряжение между точками a и b). Токи в этих двух половинах первичной обмотки текут в противоположных направлениях, поэтому они индуцируют во вторичной обмотке трансформатора $Tr1$ переменное напряжение, пропорциональное разности этих токов, т. е. пропорциональное напряжению дисбаланса измерительного моста. Фаза напряжения, индуцируемого во вторичной обмотке этого трансформатора, а значит, и направление вращения электродвигателя M , определяется знаком напряжения дисбаланса.

В цепь измерительной термопары T_1 , также параллельно включают электрическую емкость, а последовательно — резистор. Вместе эта емкость и резистор образуют так называемый Г-образный фильтр, служащий для защиты термопары от высокочастотных помех. С электродвигателем M можно кинематически связывать также индицирующие стрелки и перья самопишущих приборов.

Применяются также автоматические компенсаторы, в которых подключение для балансировки выходного параметра датчика и уравнивающего напряжения происходит периодически, а не является чем-то постоянным. Циклический характер функционирования подобных схем позволяет использовать их для опроса нескольких датчиков.

§ 10.2. Преобразователи информации с кодовыми масками

Рассмотренные выше измерительные схемы касались использования электрических величин (тока, напряжения или сопротивления, а для переменного тока также частоты и сдвига фазы). Эти электрические величины являются выходными сигналами датчиков различного типа, отображающими отклонение измеряемого параметра от нулевой точки. Между тем в механообработке задач, имеющей самостоятельное значение, является непосредственное использование механического параметра — перемещения рабочего органа станка, например суппорта токарного станка или рабочего стола фрезерного станка.

Для такого рода измерений, преобразования и дальнейшего использования всего перемещения рабочего органа станка, а не только его

отклонения от положения равновесия, применяются различные преобразователи с кодовыми масками.

Среди преобразователей этого типа наибольшее распространение получили те, которые преобразуют угол поворота входного вала в изображающее его двоичное число, хотя непосредственное преобразование перемещения движущегося рабочего органа исключает погрешности, возникающие в кинематической цепи, связывающей входной вал датчика с контролируемым перемещением. Тем не менее простота, конструктивная и эксплуатационная законченность способствуют широкому применению датчиков, преобразующих в параллельный двоичный код именно угол поворота некоторого входного вала.

Основой такого рода датчиков является кодирующий диск, на котором по концентрическим окружностям, соответствующим разрядам выходного числа, расположены участки, соответствующие 1 и 0 кода, который считывается с данного диска. При электромеханическом способе считывания информации этих участков касаются электромеханические щетки-контакты. Более надежным является бесконтактный способ считывания, основанный на использовании фотоэлектрического эффекта. В этом случае в каждом разряде надлежащим образом сформированный луч света проходит через чередующиеся прозрачные и непрозрачные участки кодовой дисковой маски или отражается от участков подобной маски, характеризующихся различным коэффициентом отражения. Прошедший через маску или отраженный ею луч света воспринимается в каждом разряде дискретным светочувствительным элементом (обычно фототранзистором) и образует электрический импульс, соответствующий углу поворота кодовой маски. Пакет таких электрических импульсов и будет представлять собой число в параллельном двоичном коде, соответствующее углу поворота кодирующего диска.

Так как в каждом последующем двоичном разряде импульсы вдвое реже и вдвое шире, чем в предыдущем, импульсы, следующие с наибольшей частотой (импульсы самого младшего разряда), нужно располагать на самой протяженной разрядной дорожке, т. е. в ряду кодов 1 и 0, наиболее удаленном от оси вращения кодового диска.

Кодовая маска изготавливается, как правило, методом фототравления. При электромеханическом считывании для кодовой маски обычно используют фольгированный гетинакс или текстолит, на который наносят фотоэмульсию. Затем производят экспозицию изображения кодовой маски, проявление и вытравливание участков, оказавшихся неэкспонированными. В результате на изоляционном диске оказывается изображение кодовых участков, соответствующих 1 и 0, образованное проводящими участками фольги. К этим участкам можно обеспечить подвод напряжения, считываемого щетками-контактами.

Развертка такой маски для электроконтактного считывания параллельных двоичных кодов приведена на рис. 10.4. Здесь против дорожки каждого разряда (0-го, 1-го, 2-го и 3-го) помещается своя считывающая

щетка-контакт, а к каждому проводящему участку маски общей шиной подводится электрическое напряжение. Проводящие участки каждого разряда (на рис. 10.4 они зачернены), обладают вдвое большей шириной, чем проводящие участки предыдущего разряда. Также вдвое большей шириной, чем в предыдущем разряде, обладают и непроводящие интервалы между проводящими участками. Поэтому при движении такой кодовой маски относительно разрядных щеток-контактов, расположенных по одной линии (на данном рисунке — вертикальной), в этих щетках-контактах возникают пакеты параллельных кодов, изображающих с определенной ценой одной единицы величину перемещения этой кодовой маски. Наличие электрического импульса, считанного в данном разряде, изображает 1, а его отсутствие — 0. Соответствующие двоичные числа показаны на рис. 10.4 над разверткой кодовой маски, что проверяется непосредственным наблюдением за данным рисунком.

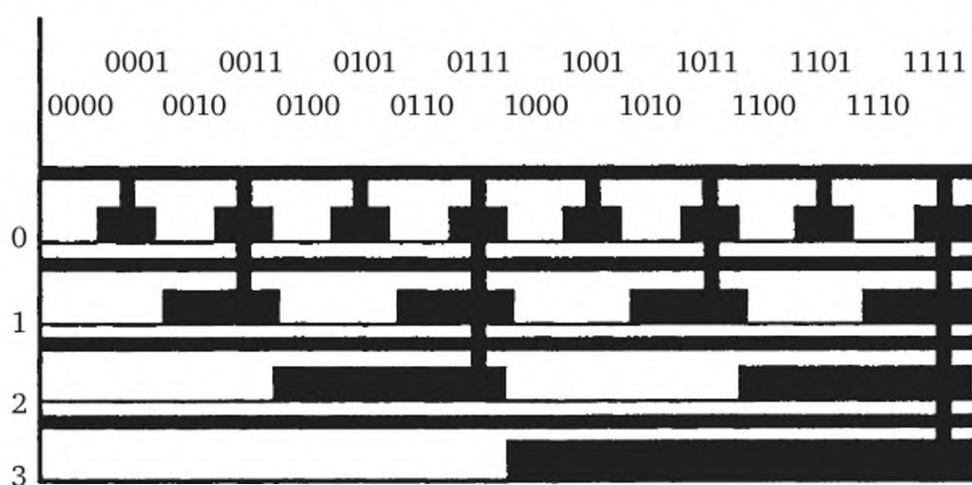


Рис. 10.4. Развертка маски для электроконтактного считывания параллельных двоичных кодов

Бесконтактные фотоэлектрические методы построения и использования кодовых масок не имеют недостатков, присущих контактному считыванию, однако они, как правило, оказываются конструктивно более сложными и основываются на использовании хрупких и тяжелых стеклянных дисков. Пример такого преобразователя, использующего фотоэлектрическое считывание проходящими пучками света, показан на рис. 10.5.

В преобразователе, приведенном на рис. 10.5, кодовая маска выполнена в виде стеклянного диска, некоторые участки которого непрозрачны. Участки образуют двоичный код. На рис. 10.5 прозрачные участки изображены заштрихованными. На боковой проекции видно, что источники света, расположенные вдоль радиуса кодового диска, направляют лучи света к диску и там, где эти лучи света могут пройти через прозрачные участки диска, они попадают на фототранзисторы, которые в данном разряде являются источниками электрических импульсов. Таким образом формируется параллельный двоичный элек-

трический код, который соответствует углу поворота кодового диска. Соответствующий рисунок на стеклянном диске, представляющий собой сочетание прозрачных и непрозрачных участков, также может быть получен методом фототравления.

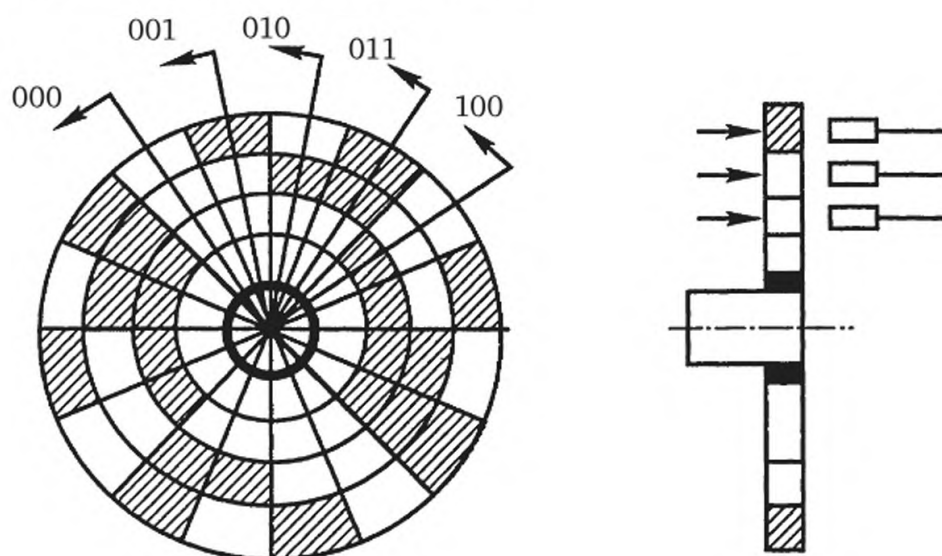


Рис. 10.5. Диск с кодовой маской и фотоэлектрическим считыванием

Заметим, что фотоэлектрическое считывание не является единственным принципиально возможным методом бесконтактного считывания при использовании преобразователей с кодовыми масками. Очевидным способом бесконтактного считывания является регистрация изменения электрической емкости при вращении диска с металлической маской относительно неподвижных металлических пластин. Однако при этом требуется большая точность изготовления и постоянство расстояния между кодирующим диском и считывающими пластинами при различных углах поворота входного вала датчика. Естественные неточности изготовления и шероховатости поверхности не должны влиять на показания датчика. Поэтому практически емкостные датчики с кодирующими масками нашли весьма ограниченное применение.

Преобразователи «угол — код» с механическими подвижными частями применяются в основном в программируемых координатных приводах систем числового программного управления.

§ 10.3. Помехозащищенное кодирование информации

Применение масок, кодирующих перемещение (в частности, угловое), может привести к неоднозначности отсчета во время переходных процессов. Это явление уже рассматривалось применительно к двоичным триггерным счетчикам, но оно имеет место и при параллельном считывании с использованием кодирующих масок, построенных в двоичном коде, т. е. в коде, который называется также «код 8421», поскольку именно таковы относительные веса его соседних разрядов.

Рассмотрим пример. При вращении кодирующего диска в положительном направлении код, снимаемый с датчика, должен изменяться в сторону возрастания соседних чисел, например, с 7 на 8, т. е. в двоичном представлении с 0111 на 1000. Это значит, что сигналы в первых трех разрядах должны исчезнуть, а в четвертом разряде — возникнуть. Однако вследствие естественных неточностей изготовления кодирующей маски, неточностей расположения считывающих элементов и разброса времени срабатывания этих элементов переключение этих элементов с 0111 на 1000 будет происходить неодновременно. На выходе датчика при его переключении какое-то время могут существовать такие числа как, например, 0111 → 0110 → 0100 → 0000 → 1000. Возможен переходный процесс и по каким-либо другим путям. Например, он может быть таким: 0111 → 0101 → 0001 → 0000 → 1000. Возможны и другие пути переключения параллельных кодов на выходе датчика, особенно при больших значениях входного угла поворота.

Если во время переходного процесса, пусть и весьма короткого, будет подан синхронизирующий (тактовый) сигнал, то в последующем устройстве, например в регистре с параллельным вводом, будет записан (зарегистрирован) именно один из этих ошибочных кодов. Использование в качестве последующих блоков асинхронных устройств, не нуждающихся в синхронизирующих сигналах, не приводит к решению проблемы, так как во время переходного процесса неверные значения будут возникать уже на выходе такого блока.

Радикальным решением здесь является использование таких кодирующих масок, выполненных в специальных кодах, которые предусматривают изменение кодовых значений при переходе от одного соседнего числа к другому только в одном разряде. Кодов, осуществляющих такие единичные переходы, может быть разработано много, но наибольшее распространение вследствие своей простой структуры и легкости последующего преобразования в обычный двоичный код получил код, называемый *кодом Грея*, или *рефлексным кодом*.

Код Грея (ГК) наряду с обычным двоичным кодом (ДК) для всех десятичных цифр (для четырех двоичных разрядов — так называемой *тетрады*) приведен в табл. 10.1.

Но при представлении двоично-кодированных десятичных чисел, т. е. когда двоичным кодом изображается не все число в целом, а каждая цифра в его десятичной записи, обычный код Грея становится неудобным. Это объясняется тем, что при переходе от 9 к 10 в двоично-кодированном десятичном коде происходит изменение трех двоичных разрядов. Между тем двоично-кодированные десятичные числа широко применяются при вводе информации, так как при таком кодировании обычные десятичные цифры могут вводиться оператором последовательно, цифра за цифрой. Поэтому в качестве двоично-кодированного десятичного кода часто применяют так называемый модифицированный код Грея с избытком 3, т. е. такой код Грея, каждая кодовая комбинация которого смещена на три позиции. Модифицированный таким образом код Грея для двоичных чисел приведен в табл. 10.2.

Таблица 10.1

Представление двоичных чисел в коде Грея

Десятичная цифра	Двоичный код	Код Грея
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101

Таблица 10.2

Представление двоичных чисел в модифицированном коде Грея

Десятичная цифра	Двоичный код	Модифицированный код Грея
0	0000	0010
1	0001	0110
2	0010	0111
3	0011	0101
4	0100	0100
5	0101	1100
6	0110	1101
7	0111	1111
8	1000	1110
9	1001	1010

Для обеспечения единичного характера перехода при смене десятков, сотен и других целых степеней 10, т. е. при переходе с 9 на 10, с 19 на 20, со 199 на 200 и т. д. применяется замена кода цифр в нечетных декадах (самая младшая декада считается нулевой, а следующая за ней по старшинству — первой).

Тогда при переходе от одной десятичной декады к последующей изменение происходит только в одном разряде. Например, переходу

от 9 к 10 в двоично-кодированном коде будет соответствовать переход от 0000 1001 к 0001 0000 (что означает изменение в трех разрядах). В коде Грея это будет соответствовать переходу от 0000 1101 к 0001 0000, что означает изменение в четырех разрядах. В модифицированном же коде Грея, когда изменения производятся только в нечетных декадах, это соответствует переходу от записи 0010 1010 к записи 0110 1010.

Однако повышения надежности ввода дискретной информации в условиях машиностроения достигают, не только устраняя неоднозначность при считывании с кодирующих масок, но и минимизируя влияние различного рода производственных помех на ввод данных, особенно при использовании длинных линий связи. Для этого применяют методы помехоустойчивого кодирования.

Самым простым из этих методов является *контроль по четности*, или *контроль по паритету*. Суть этого метода состоит в том, что к информационным двоичным разрядам, составляющим тот или иной код, всегда добавляется некоторая кодовая комбинация нулей и единиц с таким расчетом, чтобы общее количество единиц в результирующей комбинации было всегда, например, четным. Тогда устройство, считывающее информацию, проверяет общее число единиц во введенной информации, что позволяет обнаруживать случаи с искажением информации, если только такое искажение не происходило одновременно в двух или вообще в четном числе двоичных разрядов. Однако такое одновременное искажение информации является маловероятным.

Другой часто встречающийся метод построения помехоустойчивых кодов — это применение кодов с *постоянным индексом*. Под постоянным индексом понимается постоянное, заранее определенное число единиц в кодовой записи числа. Очень широко применяется код с постоянным индексом, называемый «1 из n », когда в n разрядах может существовать только одна единица. Например, команды управления движением (три кнопки: «влево», «вправо» и «стоп») кодируются по трем разным шинам 100, 001 и 010, что может быть проконтролировано на наличие в этих шинах только одной единицы. Между тем для экономии числа шин (числа двоичных разрядов) эти же команды могут быть закодированы более экономным образом с использованием только двух шин, например, так: 01, 10, 11. Однако в этом случае нельзя контролировать единственность введенной единицы.

Еще один часто применяемый код — это код «2 из 5», который является одной из разновидностей двоичного кодирования десятичных чисел. Такой код представлен в табл. 10.3.

Коды с контролем по четности или с постоянным индексом являются наиболее простыми помехоустойчивыми кодами. Когда вероятность нарушений ввода или передачи информации велика либо когда не допускается даже малейшее искажение принимаемой информации, применяются специальные коды с диагностированием и локализацией ошибок, что дает возможность организовать самоисправляющееся кодирование. Такие самоисправляющиеся коды требуют отдельного рассмотрения и описаны в специальной литературе.

Код «2 из 5»

Десятичная цифра	Код «2 из 5»	Десятичная цифра	Код «2 из 5»
0	00011	5	01010
1	00101	6	10010
2	01001	7	01100
3	10001	8	10100
4	00110	9	11000

§ 10.4. Преобразования кодов в системах обработки информации

Рассмотренный выше код «1 из n », удобный для ввода дискретной информации, не всегда удобно непосредственно использовать для управления объектами машиностроения. Зачастую возникает необходимость перевода его в другие коды, более удобные для преобразования и использования, например в двоичный или двоично-кодированный десятичный коды. Процесс перевода кода «1 из n » в обычный двоичный код зачастую называют собственно *кодированием*, а обратный перевод двоичного кода в код «1 из n » — *декодированием*. Известные и описанные в литературе методы преобразования кодов основаны на применении в качестве кодирующих и декодирующих устройств комбинационных или последовательностных (многотактных) схем и сопровождаются полным перебором всех возможных входных комбинаций и внутренних состояний схемы. Практически такие преобразования осуществимы лишь при небольшом числе входов и внутренних состояний схемы. Сложное же устройство с большим числом входных и выходных сигналов и внутренних состояний рассматривать как единое целое затруднительно, поэтому его обычно делят на меньшие части, схемно, конструктивно и эксплуатационно законченные. Эти части обычно называют *функциональными блоками* или *субблоками*. В 50—90 % случаев любое устройство может быть собрано из готовых типовых блоков со стандартными функциями. Это широко используется при построении устройств с высокой и даже средней степенью интеграции, когда вместо отдельных элементов используются целые блоки. Кодирующие и декодирующие устройства, называемые также *шифраторами* (кодеры) и *дешифраторами* (декодеры), относятся к числу таких типовых субблоков. Именно поэтому они и рассматриваются отдельно.

Наибольшее распространение получил такой шифратор, где входным сигналом является сигнал одной из десяти шин (код «1 из 10»), например, контактов кнопок или путевых выключателей, преобразуе-

мый в код тетрады одного из двоично-десятичных кодов. Одноступенчатые комбинационные шифраторы называют также простыми, а многоступенчатые схемы, когда выходы простых шифраторов части входных каналов используются в качестве входов других простых шифраторов, осуществляющих окончательное кодирование всех каналов, называются оптимальными. На рис. 10.6, а показана схема простого шифратора кода «1 из 10» в двоичный код («код 8421»), а на рис. 10.6, б — схема оптимального шифратора для этого же преобразования.

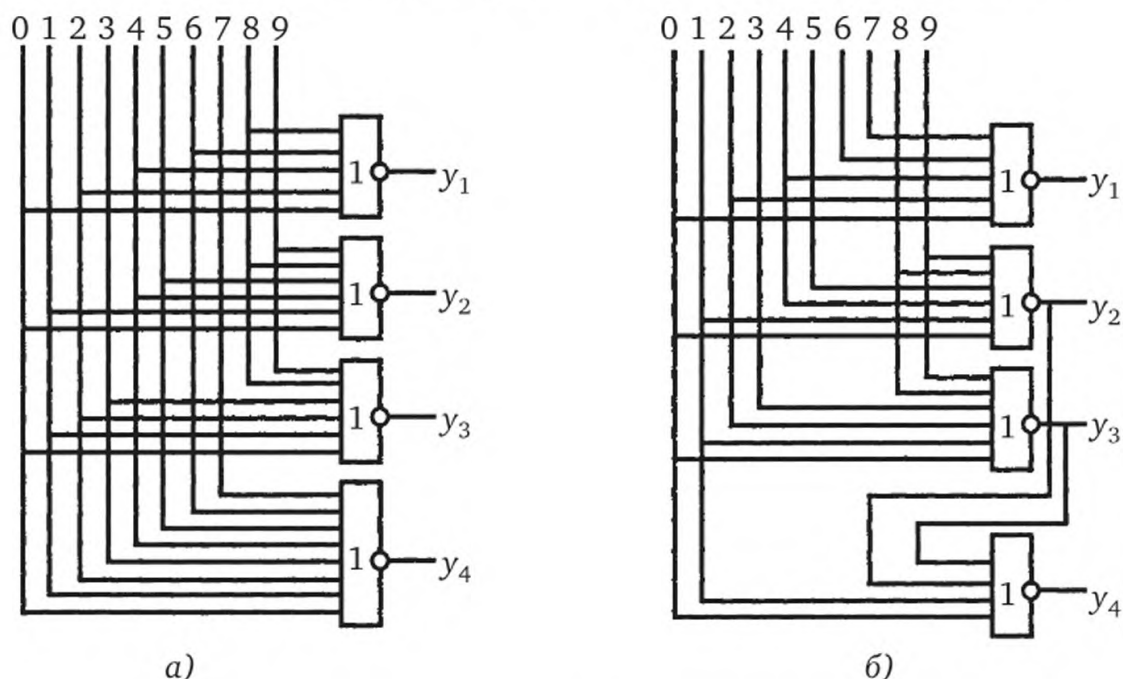


Рис. 10.6. Схемы шифраторов кода «1 из 10» в двоичный код

Схемы, изображенные на рис. 10.6, реализованы на элементах дизъюнкции с отрицанием (инверсией). Эти элементы обозначены так, как это принято на логических схемах. Аналогично можно построить и схемы шифраторов, реализованные на элементах конъюнкции с отрицанием.

Обратной задачей является дешифрация, т. е. выбор в ответ на код, подаваемый на входы устройства дешифрации, той или иной шины на выходе этого дешифратора. Подавая на входы дешифратора определенный код, можно осуществить выполнение требуемой исполнительной команды, например зажечь сигнальную лампочку, включить или выключить электродвигатель и т. д.

Дешифратор представляет собой комбинационную схему с числом входов, на которые поступает параллельный код в виде пакета сигналов, меньшим, чем число его (дешифратора) выходов. Каждый из выходов дешифратора соответствует своему сочетанию кодовых сигналов на его входе.

Дешифратор, который использует полные конъюнкции входных сигналов, называется *полным*. Дешифратор, в котором некоторые конъюнкции входных сигналов не используются, называется *укороченным*.

Дешифраторы с большим числом входов и выходов строят по матричному принципу, используя диодные сборки сигналов на базе диодных элементов, реализующих функцию конъюнкции. Схема диодной сборки, реализующей операцию конъюнкции двух аргументов, приведена на рис. 10.7.

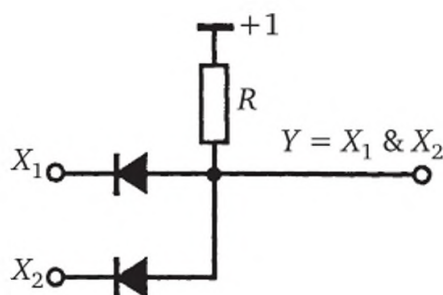


Рис. 10.7. Схема диодной сборки, реализующей операцию конъюнкции

В соответствии с этой схемой сигнал на выходе окажется равным условной единице только в том случае, когда оба диода на схеме окажутся запертыми, следовательно, ток через резистор будет отсутствовать, и на нем не будет никакого падения напряжения. Для этого требуется, чтобы на оба диода на входе узла подавалось запирающее напряжение, равное условной единице. Иными словами, выходной сигнал такого узла будет осуществлять операцию конъюнкции входных сигналов, т. е. их логическое умножение.

Надо сказать, что в принципе можно увеличивать число входов такого узла и, тем самым увеличивать число аргументов в осуществляемой этим узлом конъюнкции. Схема многоступенчатой матричной дешифрации приведена на рис. 10.8.

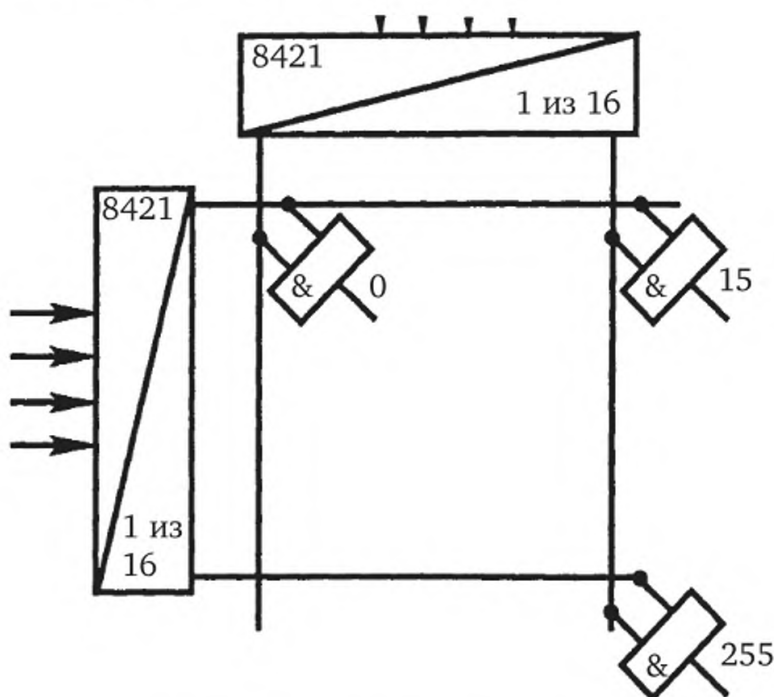


Рис. 10.8. Схема многоступенчатой матричной дешифрации

Разновидностью матричных дешифраторов может служить такая схема, в которой вместо дешифраторов первой ступени используются какие-либо счетчики импульсов, переводящие общее количество поступивших на их вход импульсов (унитарный код) в параллельный код. Тогда выходная шина выбирается в соответствии с числами, записанными в координатных счетчиках. Такой дешифратор называется *координатным* и служит основой для построения бесконтактных АТС.

Шифраторы и дешифраторы с точки зрения теории переключательных схем являются частным случаем, так как они предназначены для работы с частным случаем кодов, а именно, с кодом «1 из n ». Преобразователи же любого кода в любой другой код называются *трансляторами кодов*, или *преобразователями кодов*.

В принципе любой преобразователь кодов можно построить на базе дешифратора исходного кода, сочетающегося с шифратором в заданный выходной код. Однако такая реализация в большинстве случаев не является оптимальной ни с точки зрения числа используемых элементов, ни с точки зрения числа совершаемых операций.

Поэтому для типовых преобразователей кодов существуют отработанные решения, которыми и следует пользоваться.

Например, для преобразования кода Грея, в котором целесообразно осуществлять ввод информации, в двоичный код, в котором целесообразно выполнять дальнейшие, например арифметические, операции с этой информацией, существуют следующие соотношения:

$$\begin{aligned} Y_0 &= X_0, \\ Y_1 &= X_1 \oplus Y_0, \\ Y_2 &= X_2 \oplus Y_1. \end{aligned}$$

Тогда, если в коде Грея $X_0 = 00$, $X_1 = 01$, $X_2 = 11$, то в двоичном коде $Y_0 = 00$, $Y_1 = 01 \oplus 00 = 01$, $Y_2 = 11 \oplus 01 = 10$.

Вообще для любого разряда, начиная со 2-го (младший разряд считаем нулевым), справедливо итерационное соотношение:

$$Y_k = X_k \oplus Y_{k-1}.$$

Наоборот, для преобразования двоичного кода в код Грея справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} Y_0 &= X_0, \\ Y_1 &= X_1 \oplus X_0, \\ Y_2 &= X_1 \oplus X_2. \end{aligned}$$

Например, в двоичном коде $X_0 = 00$, $X_1 = 01$, $X_2 = 10$. Тогда в коде Грея $Y_0 = 00$, $Y_1 = 01 \oplus 00 = 01$, $Y_2 = 01 \oplus 10 = 11$.

Вообще для любого разряда, начиная со 2-го (младший разряд считаем нулевым), справедливо итерационное соотношение:

$$Y_k = X_{k-1} \oplus X_k.$$

Другими типовыми трансляторами (преобразователями) кодов являются преобразователи двоичных кодов в код «с избытком 3», а также преобразователи двоично-кодированного десятичного кода в телетайпный код и наоборот.

Для избирательного переключения каналов используются типовые устройства, называемые *коммутаторами*.

Коммутаторы принято делить на две группы:

- *селекторы (демультиплексоры, называемые в теории переключательных схем также распределителями);*
- *коллекторы (мультиплексоры).*

Селекторы служат для передачи входного сигнала на один из нескольких выходных путей, причем номер (адрес) этого выходного пути определяется с помощью специального сигнала.

Коллекторы служат для передачи на единственный выход сигналов с одной из многих входных шин, которая выбирается по специальному сигналу.

Все названные преобразователи описывались применительно к использованию параллельных кодов. Однако их можно перестроить и для работы с последовательными кодами. Особенно просто перейти от параллельного кода, к последовательному, если для описания данного преобразователя использовались итеративные соотношения, как, например, в преобразователе кода Грея в двоичный код и обратно.

Контрольные вопросы

1. Как для целей управления и исследования используются показания параметрических датчиков?
2. Как для целей управления и исследования используются показания генераторных датчиков?
3. Какие электрические величины измеряются при использовании параметрических датчиков?
4. Какие электрические величины измеряются при использовании генераторных датчиков?
5. Как устроена и работает равновесная мостовая измерительная схема?
6. Как устроена и работает неравновесная мостовая измерительная схема?
7. Какие существуют разновидности дифференциальной измерительной схемы?
8. Каковы области применения дифференциальной измерительной схемы?
9. Что такое компенсационная измерительная схема?
10. Каковы области применения компенсационной измерительной схемы?
11. Как работает компенсационная измерительная схема с ручной балансировкой?
12. Как работает компенсационная измерительная схема с автоматической балансировкой?
13. Как, помимо управления, могут быть использованы автоматические компенсаторы?
14. Как устроены и работают электромеханические преобразователи с кодовой маской?

15. Как устроены и работают фотоэлектрические преобразователи с кодовой маской?

16. Какой технологический процесс используется для получения кодовых масок у электромеханических и фотоэлектрических преобразователей?

17. Что такое неоднозначность отсчета у преобразователей с кодовой маской?

18. Каким образом возникает неоднозначность отсчета у кодовых масок, выполненных в соответствии с двоичным кодом?

19. Каким образом может быть принципиально устранена неоднозначность отсчета у преобразователей, использующих кодовые маски?

20. Что такое код Грея?

21. Что такое модифицированный код Грея?

22. Как надежность кодирования информации повышается за счет контроля по паритету?

23. Что является принципиальным недостатком контроля кодированной информации по паритету?

24. Почему, несмотря на его принципиальные недостатки, контроль по паритету получил широкое распространение?

25. Как надежность кодирования информации повышается за счет применения кодов с постоянным индексом?

26. Что такое код «1 из n »?

27. Что такое коды «2 из 5» и для чего они применяются?

28. Что такое самоисправляющиеся коды?

29. Что такое кодирование и декодирование?

30. Что такое шифратор?

31. Что такое дешифратор?

32. Что такое простой шифратор?

33. Что такое оптимальный шифратор?

34. Что такое полный дешифратор?

35. Что такое укороченный дешифратор?

36. Что такое матричный дешифратор?

37. Что такое координатный дешифратор?

38. Что называется транслятором кодов?

39. Можно ли построить транслятор кодов на шифраторе и дешифраторе?

40. Какими итеративными соотношениями описывается перевод кода Грея в двоичный?

41. Какими итеративными соотношениями описывается перевод двоичного кода в код Грея?

42. Что такое селектор?

43. Что такое коллектор?

44. Как от преобразований параллельных кодов перейти к преобразованию последовательных кодов?

Глава 11

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ АНАЛОГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВУЮ И НАОБОРОТ

§ 11.1. Квантование информации по времени и по уровню

Информация, используемая в исследовательских установках и технологическом оборудовании машиностроения, поступает с описанных ранее датчиков, как правило, в аналоговой форме. Аналоговыми электрическими величинами, которые должны восприниматься, обрабатываться и тем или иным образом использоваться, могут быть напряжение, сопротивление, ток, частота и сдвиг фазы. Иногда такой входной величиной является перемещение или угол поворота, но это специфическая задача, решаемая, как это уже было рассмотрено, с помощью различного рода кодирующих масок. Здесь будем рассматривать способы преобразования аналоговой электрической величины в электрический же код, а также способы обратного преобразования.

Цифровая информация по сравнению с аналоговой более удобна для визуального отсчета и регистрации, для передачи на расстояние и для запоминания. Кроме того, цифровая информация меньше подвержена искажениям и влиянию помех, ее легче обрабатывать (выполнять над ней различные операции). Можно добиться, чтобы во время вычислительной обработки цифровой информации ошибки вычислений не возрастали, не накапливались и не забывались. Принципиальным достоинством цифровых устройств по сравнению с аналоговыми является отсутствие явления, называемого «дрейфом нуля», т. е. изменения показаний на выходе при неизменном значении входной величины. Принципиальным же недостатком цифровой информационной технологии по сравнению с аналоговой является большая сложность цифровых устройств, обусловленная необходимостью реализации большого количества переключательных схем, зачастую весьма сложных и состоящих из большого числа элементов. Кроме того, большое число элементов, необходимое для обработки информации, приводит к увеличению времени обработки, что особенно заметно для простых операций. Достижимое при этом повышение точности зачастую просто не требуется. Современные технологии производства электронных устройств обеспечивают высокую степень интеграции при малых габ-

ритах, достаточную надежность, большое быстродействие и делают эти недостатки не очень существенными. Поэтому, как правило, полученная тем или иным образом аналоговая величина должна быть преобразована в цифровую форму и представлена в виде числа.

Числовое значение измеряемой величины определяется в процессе ее *квантования*. Квантованием называется процесс преобразования непрерывных (аналоговых) сигналов в дискретные, изменяющиеся скачками. Различают три вида квантования: по уровню, по времени и совместно — по уровню и по времени.

На рис. 11.1 представлено квантование по уровню. Для этого вида квантования характерно представление аналоговой величины лишь теми ее значениями, которые располагаются через определенные интервалы ΔY : y_1, y_2, y_3 и y_4 , а также (в отрицательной области) $-y_1, -y_2, -y_3$ и $-y_4$. Моменты времени, в которые происходит такое представление входной аналоговой величины, заранее не задаются и определяются только фактом достижения аналоговой величиной заданного уровня.

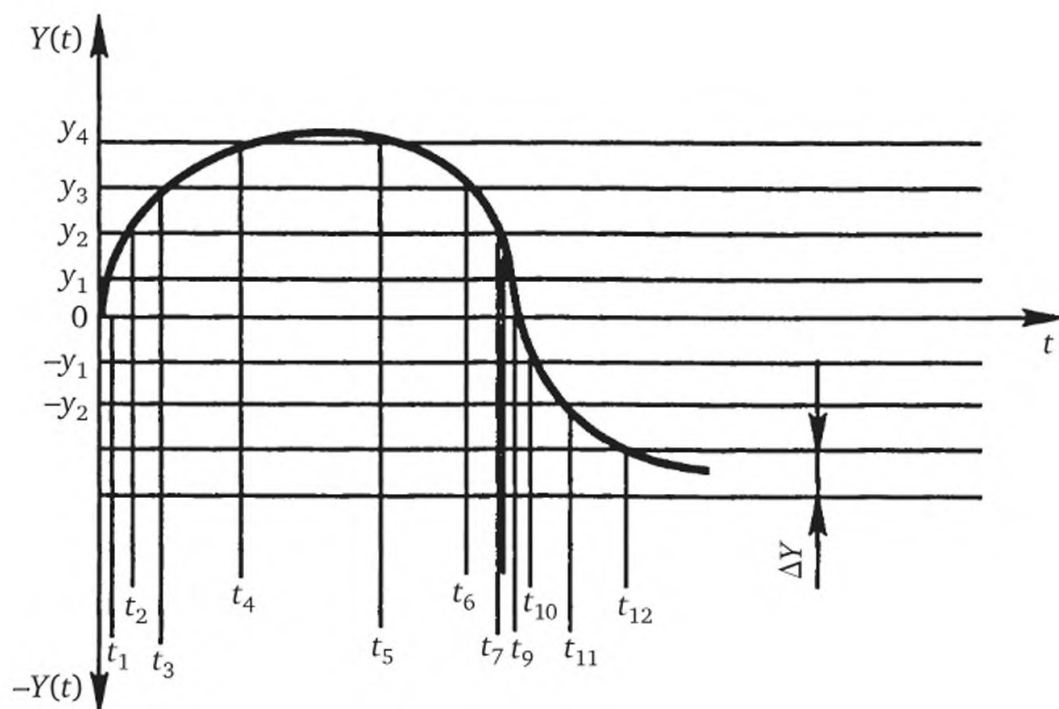


Рис. 11.1. Квантование аналоговой величины по уровню

Таким образом, $t_1 - t_0 \neq t_2 - t_1 \neq t_3 - t_2 \neq t_4 - t_3 \neq t_5 - t_4 \neq t_6 - t_5$ и т. д.

Интервалы изменений квантуемой аналоговой величины называются *шагом квантования*. Вместо действительных значений квантуемой аналоговой величины на выходе такого квантователя воспроизводятся ближайшие к ним дискретные значения. Шаг квантования выбирается исходя из допустимой погрешности. Очевидно, что чем меньше шаг квантования, тем ближе к исходной непрерывной кривой изображающая ее ступенчатая ломаная линия.

Квантование по времени показано на рис. 11.2. В этом случае непрерывная кривая заменяется ее отдельными значениями в заранее определенные моменты времени. Обычно эти моменты времени выбираются равноотстоящими друг от друга, хотя иногда на интервале резкого изменения квантуемой величины они «сгущаются», а на том интервале, где квантуемая величина остается постоянной, эти моменты времени дальше отстоят друг от друга. Промежуток времени между двумя соседними моментами, в которые определяется значение квантуемой величины, называется в этом случае *периодом дискретности*, или *интервалом квантования*. Необходимость такой операции квантования вытекает из того, что практически невозможно непрерывно оценивать аналоговую величину скачкообразно изменяющимся числом. Такую оценку можно осуществлять не непрерывно, а лишь через определенные промежутки времени, хотя бы и малые (но не бесконечно малые).

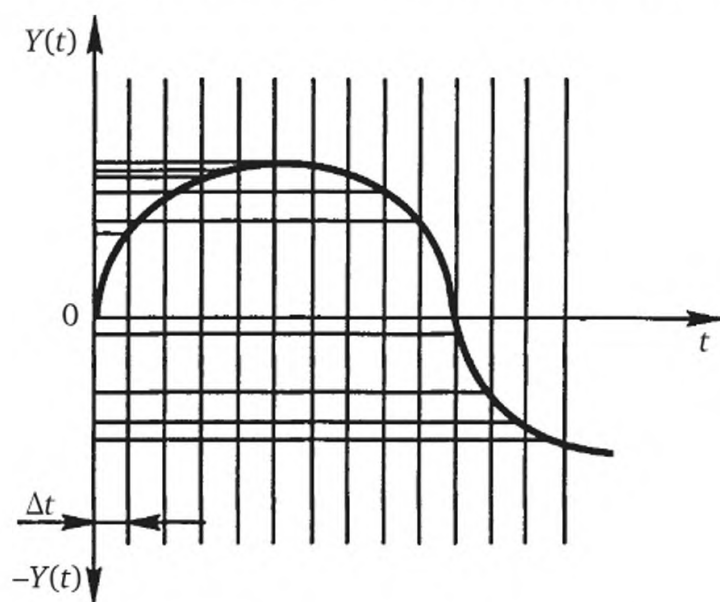


Рис. 11.2. Квантование по времени

В цифровых измерительных приборах и цифровых автоматических системах цифровое кодирование входной аналоговой величины, т. е. представление ее в виде цифрового кода, чаще всего осуществляется с помощью комбинированного подхода, сочетающего квантование и по уровню, и по времени. Квантование и по уровню, и по времени изображено на рис. 11.3.

В результате комбинированного квантования дискретные (квантованные) значения входной величины представляются в виде цифрового кода, причем наиболее удобным для дальнейшей обработки является двоичный код. Для индикации и визуального восприятия более удобным является десятичный код. Однако перевод (трансляция) двоичного кода в десятичный обычно осуществляется на выходе автоматического управляющего или измерительного устройства после выполнения операций квантования и действий над квантованными величинами.

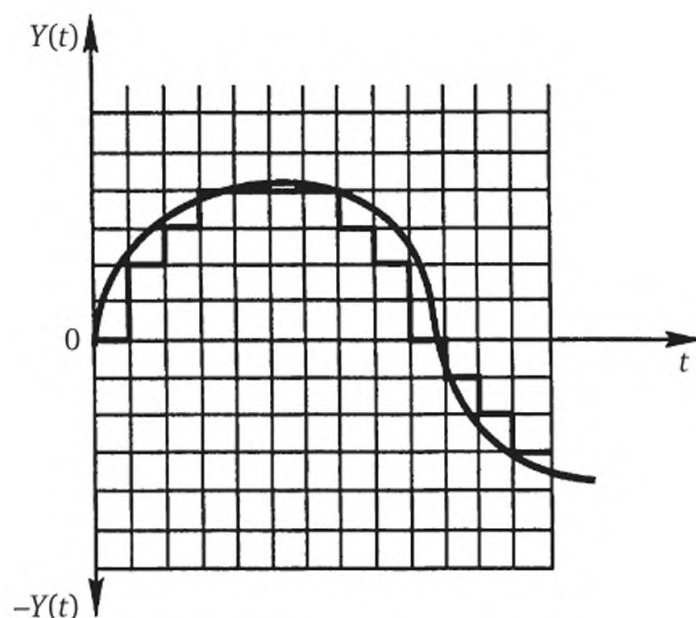


Рис. 11.3. Комбинированное квантование по времени и по уровню

§ 11.2. Аналого-цифровые преобразователи

Удобнее всего измерять в цифровой форме такие физические величины, как время и частота. Поэтому преобразователи времени в код и частоты в код применяются довольно часто.

Если входная информация изображается *протяженностью временного отрезка*, то входной сигнал стабильной частоты, например, формируемый кварцевым генератором, подается на счетчик входным фронтом сигнала, длительность которого изображает преобразуемую аналоговую величину, а задний фронт этого сигнала отключает подачу импульсов генератора на вход счетчика (запирает счетчик). Содержимое счетчика на момент подачи заднего фронта входного сигнала будет представлять собой число, пропорциональное длительности входного сигнала.

Если входная информация изображается частотой следования импульсов, то сигнал, генерируемый опорным генератором постоянной частоты, более низкой, чем измеряемая, включает и выключает подачу информационных импульсов на вход соответствующего счетчика. Для получения сигнала, открывающего и запирающего входы этого счетчика, часто используют промышленный переменный ток, гармонически изменяющийся с частотой 50 Гц, который переформируется в прямоугольные импульсы той же частоты.

Схема преобразования интервала времени в код приведена на рис. 11.4, а, схема преобразования частоты в код — на рис. 11.4, б.

Если входная информация задается шириной импульса X (см. рис. 11.4, а), то выходной сигнал Y преобразователя формируется импульсами стабильной частоты C от задающего генератора и после

окончания импульса X блокируется: Сигналы считывания со счетчика и обнуления этого счетчика на рисунке не показаны. Но эти сигналы могут быть получены различными способами. Например, в качестве таких сигналов можно использовать очередные импульсы задающего генератора при условии, что $X = 0$.

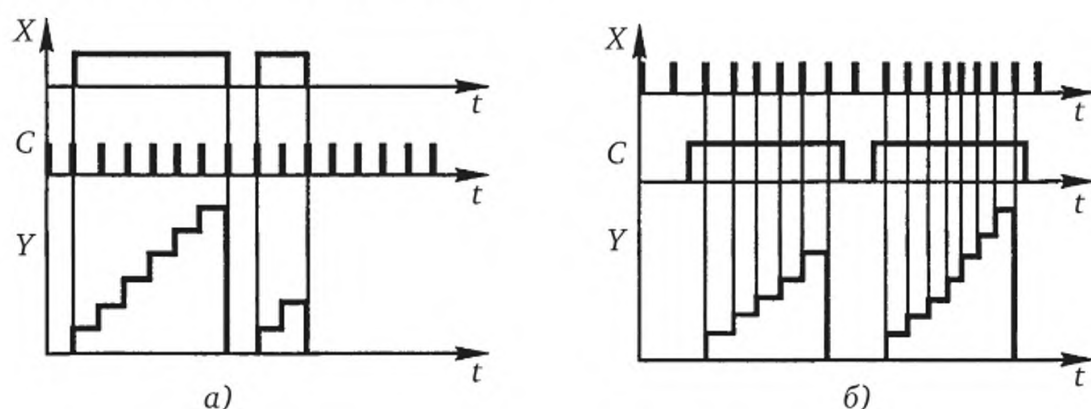


Рис. 11.4. Временные диаграммы преобразования «время — код» и «частота — код»

Если входная информация задается частотой импульсов X (см. рис. 11.4, б), то сигнал C заданной частоты и скважности, генерируемый задающим генератором, служит для запираания и отпираания счета импульсов X .

Существенным различием между этими двумя способами преобразования входной аналоговой величины в цифровую форму является тот факт, что численное выражение времени длительности входного сигнала представляет собой мгновенное значение, тогда как численное выражение частоты представляет собой усредненное значение.

Для преобразования напряжения в код достаточно построить преобразователь напряжения во время или напряжения в частоту и далее использовать те схемы аналого-цифрового преобразования, которые уже были рассмотрены. Эти методы называются методами с использованием промежуточных преобразований.

Пример временной диаграммы преобразования напряжения во временной интервал (ширину импульса) приведен на рис. 11.5.

В соответствии со схемой рис. 11.5 преобразуемая аналоговая величина — напряжение X сравнивается в аналоговом устройстве сравнения (например, с помощью автоматического компенсатора, описанного выше) с пилообразным напряжением, получаемым с помощью специального генератора, аналогичного тому, который используется для телевизионной развертки, или использующему принцип интегрирования некоторого постоянного сигнала.

Если $X \geq U_p$, то выходной импульс $Y = 1$. Если $X < U_p$, то $Y = 0$. Так как равенство X и U_p наступает в различные моменты в зависимости от величины X , то и ширина импульсов Y будет различной в зависимости от величины X .

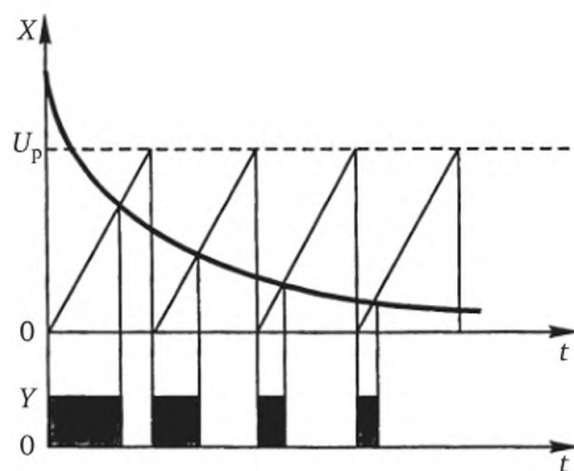


Рис. 11.5. Временная диаграмма преобразования напряжения в ширину импульса

Если генератор пилообразного напряжения блокировать и обнулять в момент достижения равенства преобразуемой аналоговой величины X и пилообразного напряжения U_p , а затем снова включать генерацию следующего пилообразного импульса, то время между соседними выходными импульсами, а значит, и их частота будут однозначно определяться значениями преобразуемой аналоговой величины. Так работает преобразователь напряжения в частоту.

Точность преобразования входного аналогового сигнала в устройствах с пилообразным напряжением зависит от точности и стабильности пилообразного напряжения, а также от точности промежуточных преобразований. Схемы преобразования с использованием мгновенных значений в значительной степени подвержены воздействию помех. Схемы, использующие усредненные значения, подобные преобразователям частоты в код, обладают большей помехоустойчивостью, но характеризуются меньшим быстродействием.

Большой помехоустойчивостью обладает так называемый двухтактный преобразователь с двойным интегрированием. Временная диаграмма такого преобразователя приведена на рис. 11.6.

В соответствии с диаграммой рис. 11.6 двухтактный аналого-цифровой преобразователь работает следующим образом. В первом такте интегрирующий усилитель интегрирует входное аналоговое напряжение X при заданной неизменной опорной частоте в течение постоянного отрезка времени T_0 , определяемого емкостью базового счетчика. Факт заполнения всего базового счетчика определяет окончание первого такта преобразования (истечение времени T_0). Значение напряжения развертки U_p в этот момент пропорционально среднему значению напряжения X за время T_0 . Во втором такте на вход интегрирующего усилителя подается эталонное напряжение обратного знака, вследствие чего напряжение U_p линейно убывает, пока не окажется, что $U_p = 0$ (пересечение ниспадающей прямой на графике напряжения развертки с горизонтальной осью). Продолжительность второго такта

преобразования T_x пропорциональна максимальному значению U_p , достигнутому в предыдущем такте, или среднему значению выходной величины X за предыдущий такт. Преобразование же длительности временного интервала в показания счетчика при неизменной опорной частоте уже разбиралось ранее. Иными словами, по показаниям счетчика, полученным во время второго такта преобразования, можно однозначно судить о среднем значении преобразуемой аналоговой величины за время первого такта преобразования.

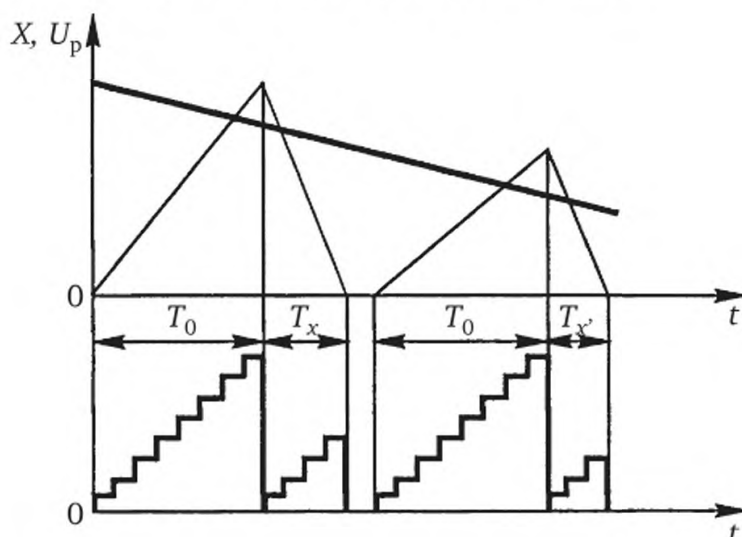


Рис. 11.6. Временная диаграмма двухтактного преобразования аналоговой величины в код

Существуют также схемы преобразователей аналоговой величины в код, не требующие использования промежуточного параметра. Такие преобразователи называются *преобразователями с подсчетом*.

Суть действия таких преобразователей состоит в том, что сигнал сброса обнуляет и запускает счетчик, выход которого и является выходом преобразователя. Питание на этот счетчик подается от генератора стабильной базовой частоты. Число, накопившееся в счетчике, подвергается обратному цифроаналоговому преобразованию (см. далее). Полученное таким образом аналоговое напряжение сравнивается со входным аналоговым напряжением (например, с помощью автоматического аналогового компаратора, описанного выше), и при достижении равенства этих напряжений формируется сигнал, отключающий дальнейший доступ опорных базовых импульсов от входа счетчика. Число, оказавшееся в этот момент в счетчике, должно быть считано раньше, чем поступит новый сигнал сброса и запуска нового цикла преобразования. Временная диаграмма такого преобразования изображена на рис. 11.7.

Выдерживать соотношение между временами считывания числа, оказавшегося в счетчике, и запуском нового цикла преобразования необязательно, если использовать реверсивный счетчик. Временная диаграмма преобразования «аналог-код» на основе использования

реверсивного счетчика, генератора стабильной базовой частоты и аналогового компаратора приведена на рис. 11.8.

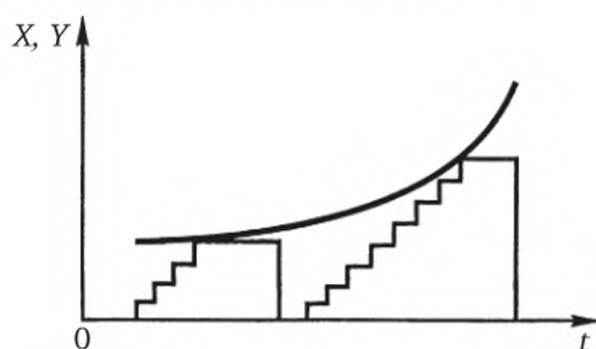


Рис. 11.7. Временная диаграмма циклического преобразования аналоговой величины в цифровую на основе подсчета базовой частоты

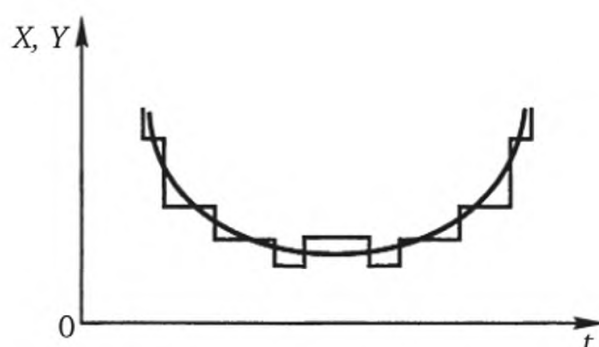


Рис. 11.8. Временная диаграмма двухтактного преобразования аналоговой величины в цифровую на основе использования реверсивного счетчика

§ 11.3. Цифроаналоговые преобразователи

Зачастую в системах измерения, исследования и управления параметрами процессов в машиностроении приходится решать задачу, обратную рассмотренной выше, а именно задачу преобразования величины, заданной в цифровой форме, в эквивалентную ей аналоговую величину. Для такого преобразования существуют различные способы — в зависимости от формы представления исходного числа и от того, в какую именно аналоговую величину оно должно быть преобразовано.

Как известно, цифровая величина может быть представлена (и использована для дальнейшего преобразования в аналоговую форму) либо в параллельном, либо в последовательном кодах. В первом случае информация представляется пакетами двоичных сигналов с разными кодовыми комбинациями (разными кодами). Во втором случае наряду с последовательно передаваемыми кодами разрядов может использоваться и серия импульсов так называемого унитарного кода (т. е. также позиционного кода, но с основанием не два и не десять, а единица).

Аналоговая величина может быть представлена в виде:

- изменений амплитуды;
- частоты гармонических колебаний;
- сдвига фазы гармонических колебаний относительно эталонных (опорных) колебаний;
- длительности импульса или длительности интервала между импульсами.

В практике машиностроения чаще всего используют такие аналоговые величины, как электрические ток и напряжение. Используют также время, частоту, линейные и угловые перемещения, а в случае гидравлических и пневматических систем — давление. Время (продолжительность сигнала) и частота обычно используются как промежуточные величины.

Наибольшее самостоятельное значение имеет преобразование цифровых электрических кодов в величины электрических же напряжения и тока. Пример построения преобразователя по принципу суммирования параметров с их весами приведен на рис. 11.9.

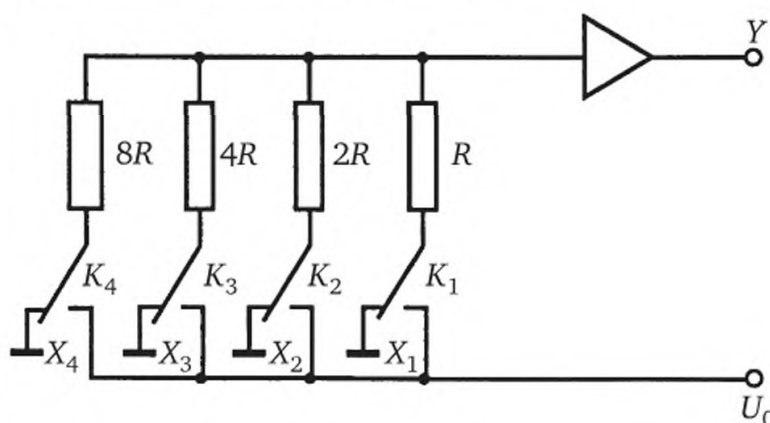


Рис. 11.9. Схема цифроаналогового преобразователя с весовыми разрядами

Эта схема функционирует следующим образом. На выходе преобразователя включен усилитель с токовым входом (с малым входным сопротивлением). Такой усилитель способен удерживать входное сопротивление постоянным и близким к нулю независимо от силы тока на своем входе. В этом случае сила тока, поступающего на вход такого усилителя, определяется тем, какой из ключей K , подсоединяющих к входу этого усилителя источник напряжения U_0 , будет замкнут, а какой — разомкнут. Величина подключаемого тока определяется величиной резистора, через который это напряжение подается на вход усилителя. Если величины резисторов подобраны таким образом, чтобы представлять собой степени 2, то сумма токов, поступающих на вход усилителя, будет представлять собой аналоговый эквивалент двоичного числа, изображаемого комбинацией сигналов $X_4X_3X_2X_1$.

Здесь описывается принцип работы преобразователей «цифра — аналог». Практически же в роли ключей K_4, \dots, K_1 обычно используются малоинерционные транзисторные переключательные схемы.

Изменение числа ступеней переключения (разрядов исходного кода) и соотношения сопротивлений в каждой из ступеней дает возможность построить преобразователи для различных входных кодов. Например, в объектах машиностроения часто применяется преобразователь такого рода для двоично-кодированных десятичных кодов.

При большом количестве ступеней разница в значении номиналов резисторов крайних ступеней становится очень большой. Тогда оказывается затруднительно выдержать соответствующие допуски. Это является принципиальным недостатком такой схемы.

Указанного недостатка лишены так называемые лестничные схемы. Пример такой схемы приведен на рис. 11.10.

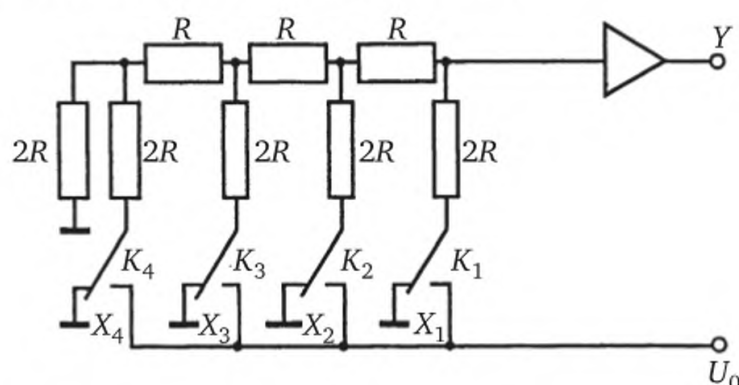


Рис. 11.10. «Лестничная» схема преобразователя «код — аналог»

В рассматриваемой схеме «лестница сопротивлений» запитывается стабилизированным опорным напряжением U_0 , а резисторы, подключаемые при замыкании того или иного ключа K_4, \dots, K_1 , образуют делитель напряжений. Усилитель, используемый в этой схеме, имеет большое значение входного сопротивления, близкое к полному разрыву, поэтому он практически не влияет на то, какие напряжения суммируются на его входе.

Если замкнут только ключ K_1 , то входное напряжение усилителя равно $U_0/2$; если замкнут только ключ K_2 , то входное напряжение усилителя равно $U_0/4$, и т. д. Таким образом, эта схема может преобразовывать параллельный двоичный код в напряжение на входе пропорционального усилителя, а значит, и на его выходе. Такое устройство легче реализовать, чем устройство на основе сопротивлений со взвешенными разрядами, изображенное на рис. 11.9. Это объясняется тем, что в этой схеме значения резисторов разделяются всего на две группы, а внутри каждой группы резисторы имеют равные номиналы. Номиналы резисторов одной группы ровно в 2 раза превышают номиналы резисторов другой группы. Естественно, и здесь ключи могут быть реализованы не в виде пар контактов, а в виде бесконтактных транзисторных логических переключательных элементов.

Преобразователи «код — время» («код — ширина импульса») могут строиться несколькими различными способами. Пример одного из таких способов приведен на рис. 11.11.

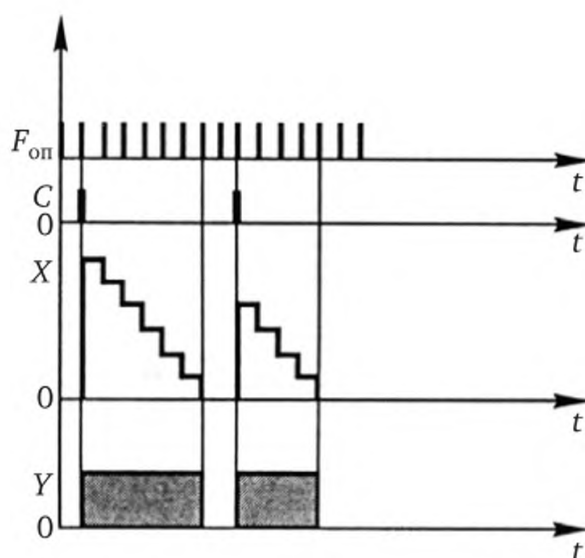


Рис. 11.11. Временная циклограмма преобразования двоичного кода в ширину импульса

Функционирует подобная схема следующим образом. За основу принимается обычный двоичный счетчик, входы которого открываются сигналом C , который одновременно заносит в этот счетчик преобразуемый код X . Затем импульсы от базового генератора «скручивают» этот счетчик (уменьшают содержащееся в нем число). Момент, когда содержимое счетчика оказывается равным нулю, служит для формирования нового сигнала, блокирующего счетный вход этого счетчика. Факт поступления нового преобразуемого числа X определяется появлением нового стробирующего сигнала C , и цикл повторяется. Стробирующие сигналы C вызывают появление передних и задних фронтов выходного импульса Y . Ширина этого выходного импульса определяется двоичным числом, заносимым в счетчик.

В тех случаях, когда ко времени преобразования не предъявляется высоких требований или когда преобразуемые числа изначально представляются последовательными кодами, применяются последовательные преобразователи «цифра — код», реализация которых обычно оказывается проще, чем в случае преобразования параллельных кодов.

Базовым принципом для последовательных преобразователей «цифра — аналог» является тот факт, что в обычном двоичном коде вес $(K + 1)$ -го двоичного разряда в 2 раза больше, чем вес предыдущего (более младшего) K -го двоичного разряда. Поэтому суммируемое напряжение, соответствующее K -му двоичному разряду, должно быть в 2 раза меньше, чем напряжение, соответствующее $(K + 1)$ -му двоичному разряду. Чтобы не применять несколько различных источников напряжения, можно осуществлять деление или умножение предыдущего напряжения на 2 (в зависимости от того, с какого разряда начинается преобразование: с младшего или со старшего).

Обычно пользуются итеративной зависимостью вида

$$U_{K+1} = (U_K + X_K U_0) / 2, \text{ где } K = 1, 2, \dots, n; U_0 = 1.$$

Значение X_K (0 или 1) соответствует фактическому значению преобразуемого кода K -го двоичного разряда.

Значения U_{K+1} находят с помощью аналоговой памяти, т. е. устройства запоминания напряжений. Для этой цели обычно используют электрическую емкость (конденсатор).

На рис. 11.12 приведена принципиальная схема такого устройства. В соответствии с этой схемой положение ключа K_1 определяется значениями X_K в данном, K -м, разряде преобразуемого кода, ключ K_2 переключается тактовыми сигналами, а ключ K_3 замыкается для снятия показаний после введения всего преобразуемого числа.

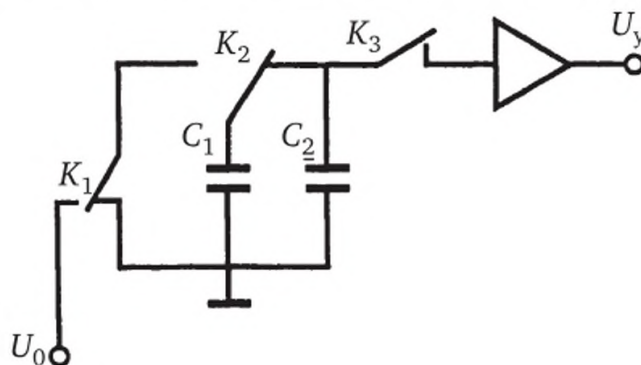


Рис. 11.12. Схема преобразователя «цифра — аналог» для последовательного кода

Емкости конденсаторов C_1 и C_2 выбираются одинаковыми, поэтому если конденсатор C_1 , заряженный во время преобразования предыдущего разряда до напряжения $X_K U_0$, останется подключенным во время паузы между тактовыми импульсами к конденсатору C_2 , ранее заряженному до напряжения U_K , результирующее напряжение U_{K+1} обоих этих конденсаторов оказывается равным именно $(U_K + X_K U_0)/2$.

После числа тактов, равного n , напряжение U_{K+1} передается на вход усилителя и сохраняется там до момента следующего замыкания ключа K_3 .

§ 11.4. Компьютеры в цепях управления параметрами механообработки

Компьютеры во все большей степени применяются в системах измерения, индикации, исследования и автоматизации объектов и процессов в машиностроении. На основе информации о состоянии объекта (данных об измеряемых величинах, сигналах об их отклонении), а также на основе сигналов, вводимых оператором или специальными устройствами, которые определяют воспринимаемые данные, пуск, останов и управление работой всей автоматической системы, операции по обработке исходной информации, компьютеры выбирают адресаты для управляющих воздействий и вырабатывают сами эти управляющие

воздействия. Общая схема системы, построенной на применении компьютеров, приведена на рис. 11.13.

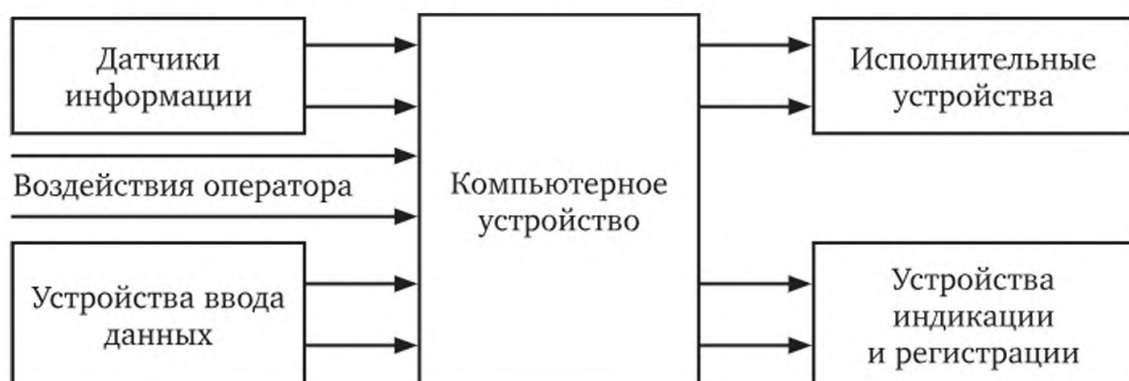


Рис. 11.13. Общая схема использования компьютеров в процессах механообработки

Укажем основные направления использования компьютеров в машиностроительных процессах и объектах.

- **Для автоматизации измерений и регистрации параметров.** В этом случае входами компьютерной системы являются преобразованные с помощью различных ранее описанных датчиков параметры, а выходом — различные индицирующие и регистрирующие устройства.

- **Для проведения исследования различных объектов и их моделей.** В этом случае входами компьютерной системы являются преобразованные с помощью различных ранее описанных датчиков параметры, над введенными данными выполняются различные операции, преобразующие введенную информацию, а выходом могут служить как различные индицирующие и регистрирующие, так и исполнительные устройства.

- **Для осуществления автоматического управления процессами и объектами машиностроения,** например для числового программного управления. В этом случае входами компьютерной системы также являются преобразованные с помощью различных ранее описанных датчиков параметры, над введенными данными выполняются различные операции, преобразующие введенную информацию, а выходом являются различные исполнительные устройства.

- **Для инженерной подготовки производства** (организационной и материально-технической), например для работы с архивами, для составления различных планов, для автоматизированной разработки конструкторской и технологической документации и др. В этом случае входами компьютерной системы являются различного рода документы, над введенными данными выполняются различные операции, преобразующие введенную информацию, а выходом также являются различные документы.

Таким образом, для применения компьютеров в процессах и объектах машиностроения необходимо осуществлять измерение параметров

и преобразование полученных аналоговых величин в цифровую форму и обратно (для формирования управляющих воздействий), что было описано выше. Необходимо также обеспечить ввод соответствующей информации помимо применяемых датчиков параметров, переработку этой информации в компьютерах, требуемую регистрацию, индикацию и исполнение.

Дискретные (двустабильные) входные сигналы обычно поступают от логических элементов других устройств, бесконтактных датчиков, различных контактов (кнопок, клавиатуры, путевых выключателей, реле и т. п.).

Здесь возникают две задачи:

- согласование параметров выходного сигнала передающего устройства и входного сигнала приемного устройства;
- борьба с помехами, возникающими в линии передачи информации и искажающими передаваемый сигнал.

Следует иметь в виду, что когда передатчиками и приемниками информационных сигналов являются быстродействующие интегральные устройства, то уже при длине линий связи в несколько метров времена задержки в элементах этих устройств будут соизмеримы с временем прохождения сигналов через линию. В этом случае для устранения искажающих сигналов и сигналов отражений на концах линии связи необходимо принимать специальные меры по согласованию параметров линий связи и приемно-передающей аппаратуры.

Контактные датчики дискретной информации, несмотря на многие очевидные недостатки, прежде всего связанные с их относительной ненадежностью и сравнительно невысоким быстродействием, все-таки являются самой многочисленной группой устройств для ввода управляющих сигналов в автоматические системы.

Если все-таки надежность и/или быстродействие контактных групп оказываются недостаточными, то применяются *бесконтактные датчики* дискретных сигналов. Специализированных дискретных (предельных) датчиков различных физических величин существует много. Отметим среди них лишь оптические, фотоэлектрические, индуктивные, а также различные триггерные схемы.

Применяются также комбинированные схемы предельных датчиков, когда контактные группы управляют бесконтактными переключательными элементами. Здесь, однако, помимо борьбы с помехами возникает задача борьбы с «дребезгом» контактов, что особенно важно, если импульсы, поступающие от контактов, подаются на счетные схемы или на схемы с запоминанием. Триггер с отдельными входами, к которым подключены переключающие контакты, является хорошей защитой от «дребезга» контактов, что показано на логической схеме рис. 11.14. Такой триггер может быть построен на логических элементах «И» с отрицанием.

Однако входные линии большой протяженности могут служить антенной для приема различного рода электромагнитных помех. Поэ-

тому в длинных линиях связи собственно информационный дискретный сигнал лучше формировать на выходе линии внутри самого приемного устройства. Такие схемы показаны на рис. 11.15.

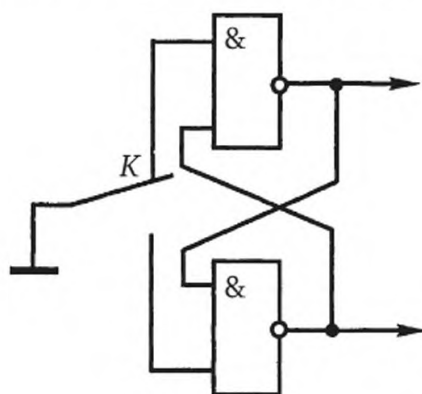


Рис. 11.14. Схема подключения контактного предельного датчика к триггеру с раздельными входами

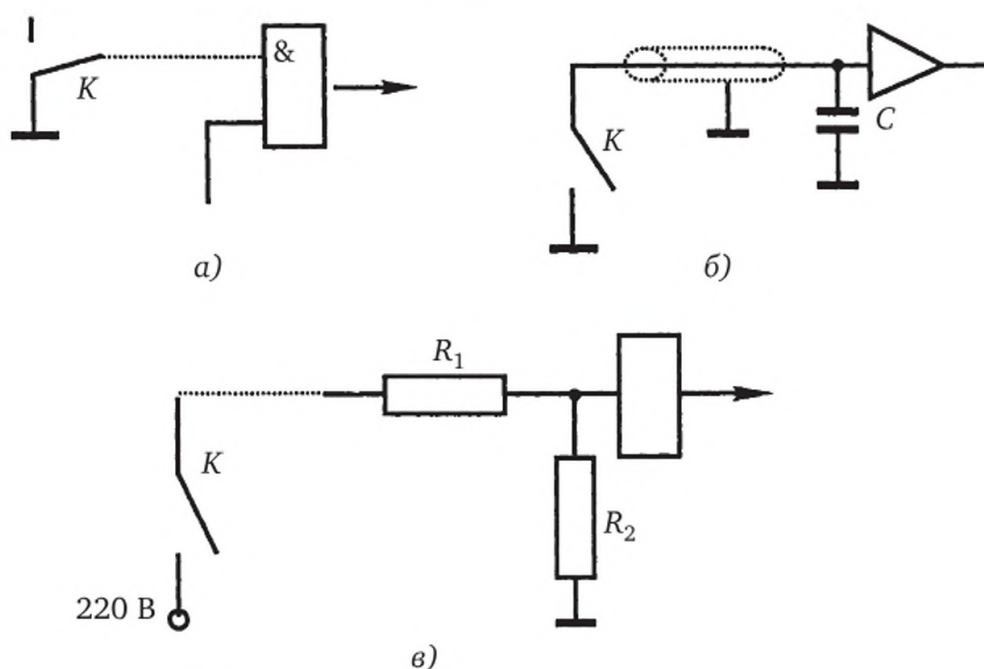


Рис. 11.15. Различные схемы подключения контактов через длинную линию

На схеме рис. 11.15, а соединительный провод всегда несет в себе какой-то входной сигнал, на схеме рис. 11.15, б используется экранированный провод с заземленной обмоткой и специальный приемник входного сигнала в виде усилителя, а на рис. 11.15, в входной сигнал формируется с помощью высокого напряжения, значительно превышающего уровень возможных помех, а на вход приемника этот сигнал подается через делитель напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 .

Там, где используются высокие мощности (например, в коммутующем оборудовании, электродвигателях, трансформаторах и т. п.), что как раз характерно для технологического оборудования механо-

обработки, приходится осуществлять *гальваническую развязку* измерительных цепей датчиков от силовых цепей. Простейшим разделяющим элементом, обеспечивающим такую развязку, можно считать электромагнитное реле. Возможны и другие, в том числе бесконтактные, схемы на переключающих магнитных элементах, подобных рассмотренным выше, которые обеспечивают гальваническую развязку. Наиболее современным решением этой задачи является реализация гальванической развязки на паре светодиод — фототранзистор. Такого рода сочетание называется *трансоптором*, или *оптроном*.

Входные дискретные сигналы часто подаются на входы счетно-решающих устройств не по одному, а группами в соответствии с записываемым или тактовым сигналом. Несколько групп сигналов может вводиться в одно и то же устройство, например в шифратор, независимо друг от друга. Для разделения входных цепей групп сигналов обычно используются диоды.

Для дискретного ввода данных в компьютерные цепи также служат различного рода кнопки, клавиши, переключатели и другие устройства, объединяемые общим названием «устройства ручного ввода». Для дискретного ввода применяют также устройства оптического считывания, устройства ввода с промежуточных носителей и устройства, «читающие» тексты, графики и таблицы (сканеры).

В компьютеры, представляющие собой устройства дискретной автоматики, аналоговые сигналы с датчиков если и вводятся, то исключительно для дальнейшего прохождения через аналого-цифровой преобразователь. Если аналоговый электрический сигнал отображает перемещение, то его преобразуют в код с помощью отдельного аналого-цифрового преобразователя. Если непрерывные сигналы отображают параметры какого-либо физического процесса, то один аналого-цифровой преобразователь может быть использован для восприятия нескольких таких параметров, подключаемых к его входам поочередно.

На выходе компьютерных сетей помимо штатных внешних компьютерных устройств (принтеров, дисплеев, модемов и др.) могут быть использованы специальные *индикаторы* и *регистраторы*.

Индикаторами двоичных чисел чаще всего являются электрические лампы накаливания и газоразрядные лампы (обычно неоновые).

Для индикации десятичных цифр наиболее широко применимыми индикаторами являются:

- цифровые газоразрядные лампы;
- сегментные индикаторы;
- проекционные индикаторы;
- точечные и мозаичные индикаторы.

Цифровые газоразрядные лампы имеют катоды, выполненные из проволоки в виде цифр. Выбор той или иной цифры осуществляется с помощью кода «1 из 10».

Сегментные индикаторы состоят чаще всего из 7 (иногда из 8) светящихся сегментов, которые могут образовать очертания всех 10 цифр.

Такой набор сегментов показан на рис. 11.16. Выбор и подключение к напряжению набора сегментов, соответствующего тому или иному коду, осуществляется с помощью описанного выше транслятора кодов.



Рис. 11.16. Пример восьмиэлементного сегментного индикатора

Проекционный индикатор использует столько отдельных миниатюрных ламп накаливания, сколько требуется высветить различных знаков.

Поток света от отдельной лампы проходит через пластинку с изображением знака и с помощью системы линз проецируется (обычно в увеличенном виде) на экран в требуемом месте.

Точечный, или мозаичный, индикатор представляет собой прямоугольник, составленный из одинаковых полей. Выбор и освещение тех или иных полей на общей плоскости и определяет форму индицируемого знака.

Цифровые индикаторы могут объединяться для индикации не только отдельных цифр, но и многозначных чисел.

Что касается регистраторов, то чаще всего используется шесть видов таких устройств, а именно:

- телетайпы;
- ленточные перфораторы;
- печатающие устройства (принтеры);
- устройства записи на аудио- и видеокассеты;
- устройства записи на компакт-диски;
- расчерчивающие устройства (плоттеры).

Контрольные вопросы

1. Что такое квантование аналоговой величины?
2. Каковы основные преимущества цифрового способа представления и обработки информации по сравнению с аналоговым?
3. Каковы основные недостатки цифрового способа представления и обработки информации по сравнению с аналоговым?

4. Что такое квантование по уровню?
5. Что такое шаг квантования?
6. Как выбирается шаг квантования?
7. Что такое квантование по времени?
8. Что такое интервал квантования?
9. Как выбирается интервал квантования?
10. В чем заключается комбинированное квантование по уровню и по времени?
11. Какие аналоговые параметры модулируются при аналоговом представлении физической величины?
12. Какие существуют способы цифрового представления физической величины?
13. Как происходит преобразование аналоговой величины напряжения в аналоговую величину ширины импульса?
14. Как происходит преобразование аналоговой величины частоты в аналоговую величину ширины импульса?
15. Что такое преобразователи «аналог-код», работающие по принципу промежуточного аргумента?
16. Как устроены преобразователи «аналог-код», работающие по принципу двойного интегрирования?
17. Как определяется длительность первого такта преобразования «аналог-код» при двойном интегрировании?
18. Как определяется длительность второго такта преобразования «аналог-код» при двойном интегрировании?
19. Как работают преобразователи «аналог-код» с подсчетом при использовании нереверсивного счетчика?
20. Как работают преобразователи «аналог-код» с подсчетом при использовании реверсивного счетчика?
21. В какую физическую аналоговую величину чаще всего преобразует код и почему?
22. Как устроены и работают преобразователи «код-аналог», использующие принцип взвешивания разрядов?
23. Как реализуются разрядные ключи в преобразователях «код-аналог»?
24. Каковы основные принципиальные недостатки преобразователей «код-аналог», использующих принцип взвешивания разрядов?
25. Что такое «лестница сопротивлений» в преобразователях «код-аналог»?
26. Каковы принципиальные преимущества преобразователей «код-аналог», использующих принцип «лестницы сопротивлений»?
27. Как устроены и работают преобразователи «код-время»?
28. В каких случаях используется преобразование последовательного кода в аналоговую величину?
29. Какие итеративные соотношения положены в основу при преобразовании последовательного двоичного кода в аналоговую величину?
30. Как осуществляется умножение и деление на 2 в двоичной системе счисления?
31. Как осуществляется запоминание аналоговой величины при преобразовании последовательного двоичного кода в аналог?
32. Какова общая схема применения компьютеров в цепях измерения, исследования и управления?
33. Что является входом и выходом при применении компьютеров в целях измерения?
34. Что является входом и выходом при применении компьютеров в целях индикации и регистрации?

35. Что является входом и выходом при применении компьютеров в целях исследования?
36. Что является входом и выходом при применении компьютеров в целях автоматизации управления технологическими объектами?
37. Что является входом и выходом при применении компьютеров в целях автоматизации инженерной подготовки производства?
38. Какие сигналы поступают на входы компьютеров, используемых в цепях измерения, исследования и управления?
39. Какие сигналы вырабатываются на выходах компьютеров, используемых в цепях измерения, исследования и управления?
40. Как может осуществляться ввод дискретных сигналов?
41. Как устроен и работает контактный ввод дискретных сигналов?
42. Как устроен и работает бесконтактный ввод дискретных сигналов?
43. Каково влияние длинной линии на ввод дискретных сигналов?
44. Как устраняется влияние длинной линии на ввод дискретных сигналов?
45. Что такое гальваническая развязка и зачем она применяется?
46. Как может быть реализована гальваническая развязка?
47. Что такое оптроны или трансопторы?
48. Как передаются и принимаются группы дискретных сигналов?
49. Как устроены и работают выходные индикаторы на газоразрядных лампах?
50. Как устроены и работают выходные индикаторы сегментного типа?
51. Как устроены и работают выходные индикаторы проекционного типа?
52. Как устроены и работают выходные индикаторы точечного или мозаичного типа?
53. Какие типы регистраторов используются в компьютерных цепях?

Глава 12

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНООБРАБОТКОЙ

§ 12.1. Общие требования к приводам подач, приводам главного движения и вспомогательным механизмам механообрабатывающих станков

Исполнительные механизмы в устройствах переработки и использования технологической информации предназначены для воздействия на регулируемый процесс — непосредственно или через регулирующий орган.

Выходным параметром исполнительных устройств в технологическом оборудовании машиностроительных производств, как правило, является перемещение того или иного рабочего исполнительного органа. По характеру перемещения, создаваемого исполнительными устройствами, они могут быть разделены на приводы поступательного, вращательного или поворотного (в пределах одного оборота) перемещения.

В зависимости от своей физической природы каждое из выше-названных исполнительных устройств может быть электрическим, гидравлическим или пневматическим. Электрические исполнительные устройства, в свою очередь, подразделяются на электродвигатели и электромагнитные исполнительные устройства. Соответствующая классификация исполнительных устройств приведена на рис. 12.1.

Исполнительные устройства различной физической природы, называемые также *сервоприводами*, применяются в технологическом оборудовании машиностроения, конкретно в станкостроении, для осуществления следующих движений:

- координатных перемещений подач;
- главного движения;
- вспомогательных движений механизмов станков.

К каждому из этих видов исполнительных устройств предъявляются свои технические требования и находятся пути для выполнения этих требований.

Координатные приводы подач бывают двух видов: дискретные (шаговые) и следящие. В свою очередь, приводы подач дискретного

типа делятся на приводы с силовым шаговым двигателем (ШД), соединенным через кинематическую цепь с исполнительным механизмом, и на приводы, в которых управляющий шаговый двигатель (ШД), играющий роль задатчика угла поворота, сочетается с усилителем крутящего момента, выполненным в виде автономной следящей системы, обычно гидравлической. Область применения следящего привода подач особенно расширилась после создания высокомоментных электродвигателей с постоянными магнитами. Для управления скоростью вращения таких двигателей применяют тиристорные преобразователи, что будет более подробно рассмотрено в дальнейшем. Использование реверсивных тиристорных преобразователей, построенных по многофазной мостовой схеме, позволяет реализовывать реверсивные приводы подач с высокими динамическими качествами.

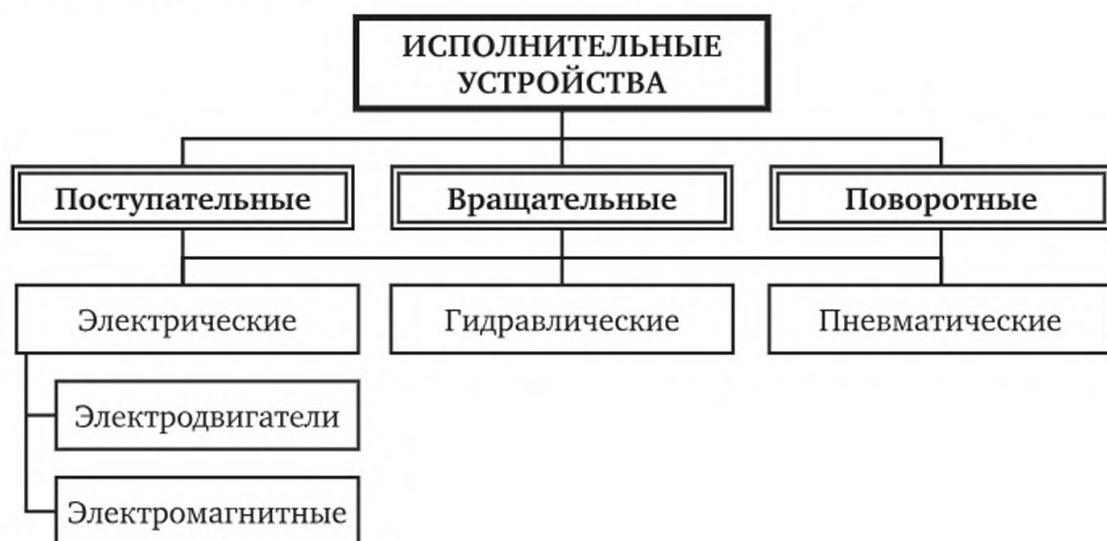


Рис. 12.1. Классификация исполнительных устройств

От координатных приводов подач требуются:

- высокая точность перемещения;
- независимость точности перемещения от того, на каком участке полного перемещения осуществляется заданное движение;
- возможность регулирования скорости движения в достаточно широком диапазоне;
- возможность реверсирования (движения в обратном направлении);
- независимость скорости и точности перемещения от нагрузки на исполнительный привод.

В приводах *главного движения* применяют преимущественно регулируемые электроприводы с двигателем постоянного тока (обычно с тиристорным преобразователем). При этом мощность привода главного движения изменяется в зависимости от числа оборотов шпинделя. Статистические исследования загрузки станков показывают, что от нижней границы до примерно середины диапазона регулирования зависимость потребляемой мощности от числа оборотов шпинделя

близка к прямо пропорциональной, и регулирование привода следует производить при постоянном моменте. Затем потребляемая мощность растет, вблизи от верхнего предела диапазона регулирования достигает максимума, а затем при наибольших числах оборотов даже несколько снижается (это соответствует чистовой обработке). На этом участке (верхней половине диапазона регулирования) привод можно регулировать при постоянной максимальной мощности. Такое регулирование принято называть *двухзонным*.

От приводов главного движения требуются:

- высокая точность поддержания заданной скорости;
- возможность регулирования скорости движения в достаточно широком диапазоне;
- возможность реверсирования (движения в обратном направлении);
- независимость скорости движения от нагрузки на исполнительный привод.

К вспомогательным движениям современных станков относятся реверсирование и остановка шпинделя, в том числе и в заданном положении, переключение поддиапазонов частоты вращения приводов главного движения, а также подача, поиск и смена инструмента, коррекция и фиксация его положения, установка рабочих органов в исходное положение, позиционирование заготовки, зажим и освобождение заготовки, фиксация и высвобождение подвижных узлов станка, включение и выключение систем смазки, охлаждения, удаления стружки и др.

Для выполнения этих функций в конструкции станка предусматриваются специальные вспомогательные механизмы, имеющие свои сервоприводы. Сервоприводы *вспомогательных механизмов* могут иметь как постоянную, так и регулируемую скорость. Регулируемые сервоприводы вспомогательных механизмов служат для выполнения точных делительных и/или установочных перемещений.

От приводов вспомогательных механизмов требуются:

- высокие динамические качества;
- большие рабочие усилия;
- высокая кратность пускового момента (или усилия) по отношению к номинальному;
- способность достаточно просто сочетаться с разнообразными по конструктивному исполнению механизмами.

Этим требованиям в наибольшей мере отвечают гидроприводы (поступательного, вращательного и поворотного движений). Там, где требуется высокая мощность, применяют пневматические и пневмоэлектрические приводы.

В электроприводах вспомогательных механизмов используют двух- и трехфазные асинхронные нерегулируемые двигатели, а также шаговые двигатели (ШД) и двигатели постоянного тока (в том числе малоинерционные и высокомоментные). Соответствующая классификация приводов, используемых в станкостроении, приведена на рис. 12.2.



Рис. 12.2. Классификация приводов в станкостроении

Для описания свойств любого привода независимо от его физической природы используются следующие три характеристики.

1. *Рабочая характеристика* двигателя представляет собой зависимость числа оборотов двигателя n и момента M на валу двигателя от полезной мощности P этого двигателя ($n_{\text{ном}}$ и $P_{\text{ном}}$ — номинальные число оборотов и мощность).

2. *Механическая характеристика* двигателя определяет зависимость числа оборотов двигателя n от развиваемого им момента M при различных значениях параметра, определяющего его обороты, например, напряжения питания двигателя. Следует говорить о *семействе* механических характеристик двигателя.

3. *Регулировочная характеристика* двигателя определяет зависимость числа оборотов, развиваемых двигателем, от той величины, изменением которой устанавливают эти обороты. Регулировочные характеристики двигателя также представляют собой *семейство* кривых, у которого параметром является величина нагрузки. Регулирующей величиной, например для электродвигателей, может являться напряжение, подаваемое на якорь двигателя постоянного тока, или ток его обмотки возбуждения.

Примеры названных характеристик приведены на рис. 12.3, а, б и в.

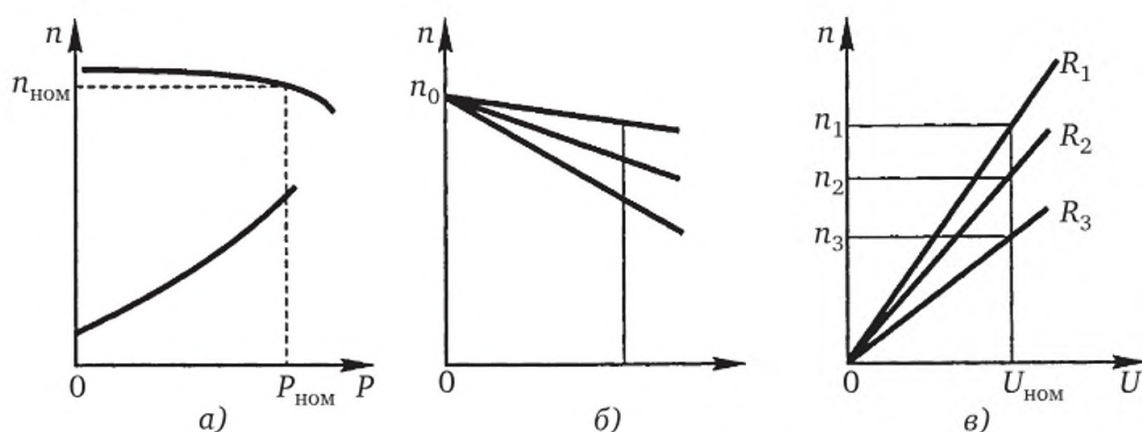


Рис. 12.3. Характеристики двигателей

Рассмотрим несколько подробнее семейство механических характеристик двигателя при различных нагрузках, приведенное на рис. 12.3, б. Из приведенного графика видно, что характеристики этого семейства можно считать прямыми линиями с отрицательным наклоном, исходящими из одной точки. Это значит, что, во-первых, когда двигатель не развивает никакого полезного момента ($M = 0$), его обороты максимальны, а, во-вторых, под нагрузкой при прочих равных условиях (например, при неизменности напряжения, которое подается на двигатель) обороты будут снижаться. Как говорят, двигатель «проседает» под нагрузкой. Характеристику, при которой двигатель сильно снижает свои обороты под нагрузкой, принято называть *мягкой*; а когда двигатель незначительно снижает свои обороты под нагрузкой, характеристику принято называть *жесткой*.

Естественно, что для задач, решаемых в станкостроении, желательно использовать двигатели с жесткой характеристикой. Будет ли характеристика того или иного двигателя мягкой или жесткой, зависит от конструктивных параметров данного двигателя. Однако схемным путем при соответствующем включении данного двигателя можно, не меняя его конструкции, сделать его механическую характеристику жесткой. Более подробно это будет описано в дальнейшем.

§ 12.2. Регулируемые электрические двигатели и другие исполнительные устройства

Для построения систем автоматизации технологического оборудования, прежде всего металлорежущих станков, необходимо создание и использование высокоэффективных электрических исполнительных приводов (электрических сервоприводов).

По типу базового исполнительного двигателя электрические приводы могут быть разделены на приводы с двигателями постоянного тока, с синхронными (вентильными) двигателями переменного тока, с асинхронными двигателями и с импульсными шаговыми двигателями.

По способу выполнения силового преобразователя различают электроприводы тиристорные — с применением управляемых клапанов, и транзисторные (транзисторно-тиристорные).

По возможности изменения направления вращения различают электродвигатели реверсивные и нереверсивные.

В настоящее время в станкостроении применяется в основном *автоматизированный электропривод*, т. е. привод с автоматическим регулированием параметров движения, а именно:

- *регулируемый* электропривод, обрабатывающий задание по скорости вращения;
- *следящий* электропривод, обрабатывающий перемещение исполнительного органа в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;
- *позиционный* электропривод, обеспечивающий обработку заданного положения исполнительного органа технологического оборудования;
- *адаптивный* электропривод, автоматически подбирающий структуру или параметры системы регулирования при изменении условий работы.

Электродвигатели постоянного тока широко используются в схемах автоматики, так как они позволяют плавно регулировать обороты, получать практически любые скорости вращения и достаточно просто реверсироваться.

Электродвигатель постоянного тока состоит из статорной станины цилиндрической формы с закрепленными на ней *полюсами*, которые для улучшения формы создаваемого ими магнитного поля заканчиваются *полюсными наконечниками*, из *статорной обмотки*, охватывающей полюса, из сердечника ротора, напессованного на ось, из *обмотки ротора*, состоящей, из отдельных секций, концы которых подсоединены к пластинам *коллектора*. Напряжение постоянного тока подается на секции роторной обмотки через коллектор, по которому скользят *щетки* (обычно графитовые).

Электромагнитные полюса статора создают магнитный поток, пронизывающий роторную обмотку. По этой обмотке протекает ток, подаваемый через коллектор. В результате взаимодействия магнитных потоков статора и ротора возникает крутящий момент, заставляющий ротор вращаться.

Ток в статорной обмотке называют также током возбуждения. Часто магнитный поток статора создается не электромагнитами, а постоянными магнитами. Тогда величина вращающего момента определяется только напряжением обмотки ротора. Для улучшения динамических качеств разработаны специальные конструкции регулируемых двигателей с малоинерционным ротором и ротором, полученным печатным монтажом.

Обмотка возбуждения может питаться от отдельного источника напряжения, в таком случае говорят, что имеет место независимое

возбуждение. Она может также питаться от того же источника, что и роторная обмотка, причем может включаться с нею последовательно (по серийной схеме), параллельно (по шунтовой схеме) или последовательно-параллельно (по компаунд-схеме).

Обороты двигателя постоянного тока можно регулировать следующими способами:

- изменением напряжения питания;
- изменением активного сопротивления в цепи якоря;
- изменением магнитного потока статора;
- изменением действующего (за период) значения силы тока якоря

в случае питания обмотки якоря импульсами переменной ширины.

Регулирование изменением напряжения питания осуществляется либо за счет питания от специального генератора, выходное напряжение которого можно плавно изменять, либо с помощью регулируемого делителя напряжения, либо за счет использования изменяющегося выходного напряжения усилителя.

Можно также осуществлять регулирование скорости вращения путем изменения сопротивления цепи якоря, однако при этом значительная часть мощности теряется на нагрев регулировочного реостата.

Регулирование оборотов двигателя за счет использования регулировочных реостатов в цепи обмоток возбуждения является более экономичным.

Однако наибольшее распространение, особенно в устройствах автоматики, получил импульсный способ регулирования оборотов. Для управления двигателями малой мощности используются транзисторные схемы, изменяющие длительность импульсов тока, а для двигателей средней и большой мощности применяются тиристорные схемы.

Тиристор представляет собой газонаполненный электронный триод или функционально аналогичный ему полупроводниковый триод, у которого на сетку и анод (а в случае полупроводникового триода — на базу и коллектор) подаются периодические колебания, чаще всего гармонические. После того как в результате подачи на сетку (или на базу) газонаполненный (или полупроводниковый) триод отпрется (как говорят — «зажжется»), дальнейшее снятие сигнала с сетки (или с базы) не приведет к запирающему триода. Он останется открытым до следующей полуволны анодного (или коллекторного) напряжения. Таким образом, длительность импульса тока, протекающего через этот триод, будет однозначно определяться сдвигом фазы импульсов сетевого напряжения по отношению к анодному (или в случае использования полупроводникового тиристора — сдвигом фаз напряжения базы и коллекторного напряжения). Параметры схемы можно выбрать так, чтобы за счет включения в цепь якоря фильтра из индуктивности и конденсатора и за счет применения многофазных тиристорных схем обеспечить величину пульсации напряжения питания в пределах 5...10 %. При этом поведение двигателя практически не отличается от его работы при постоянном напряжении.

Область применения следящего электрического привода в станкостроении и вообще в технологическом оборудовании механообработки особенно расширилась после появления высокомоментных двигателей с постоянными магнитами и малоинерционным ротором.

Регулируемые электродвигатели следящего привода сами по себе охватываются отрицательной обратной связью по скорости вращения, реализуемой обычно с помощью *тахогенератора*. Тахогенератор представляет собой микромашину постоянного тока с независимым возбуждением и является генераторным датчиком оборотов, поскольку вырабатываемое им напряжение пропорционально его скорости вращения. Тахогенератор обычно устанавливается соосно с электродвигателем, обороты которого он измеряет. Отрицательная обратная связь по скорости вращения придает механической характеристике данного регулируемого двигателя «жесткость», т. е. при изменении момента сопротивления (нагрузки) M_c его обороты должны будут изменяться лишь незначительно. В самом деле, если обороты двигателя под воздействием, например, возросшего момента нагрузки M_c начнут снижаться, то это приведет к снижению напряжения на выходе тахогенератора и к уменьшению величины, вычитаемой из напряжения, поступающего на вход усилителя. Это значит, что напряжение на выходе этого усилителя автоматически вырастет и регулируемый электродвигатель будет запитываться большим напряжением, что должно скомпенсировать возрастание M_c .

В следящих приводах подач осуществляется также отрицательная обратная связь по угловому положению выходного вала привода, например с помощью описанного выше резольвера, работающего в трансформаторном режиме. Выходной сдвиг фазы резольвера с помощью тиристорного преобразователя воздействует на широтно-импульсно-модулированное напряжение, поступающее на вход регулируемого двигателя постоянного тока, что приводит к регулированию его оборотов.

В целом следящие электроприводы постоянного тока с отрицательными обратными связями по скорости и по положению обеспечивают точно дозированное перемещение рабочего исполнительного органа с достаточно большим усилием и в малой зависимости от испытываемых нагрузок. Это особенно важно для тяжелых станков и станков с числовым программным управлением.

Для малых станков и технологического оборудования с малыми нагрузками, например для электроэрозионных станков, применяются *шаговые двигатели* (ШД). Конструктивная схема такого двигателя приведена на рис. 12.4.

Шаговый двигатель состоит из статора с внутренним зубчатым венцом и ротора с наружным зубчатым венцом (на рис. 12.4 для наглядности показаны «затрубленные» венцы, содержащие лишь по четыре таких зубца). На обмотки, расположенные на статоре и роторе, подаются сигналы, существенно отличающиеся от гармонических, напри-

мер, прямоугольные импульсы. Ступенчатым изменением поступающего напряжения обусловлено прерывистое вращение магнитного поля, создаваемого этим напряжением в воздушном зазоре между ротором и статором. Таким образом, ШД преобразует поступивший на его вход унитарный код в угол поворота своего вала, и устойчивому положению ротора соответствует такое, при котором магнитный поток, создаваемый обмотками, замыкается через минимальный воздушный зазор между зубцами ротора и статора. Управление вращением магнитного поля осуществляется с помощью электронных схем, переключающих обмотки. Возможны различные схемы коммутации, при которых устойчивыми будут не только положения «зубец (ротора) против зубца (статора)», но и положения «зубец против зубца с заданным смещением».

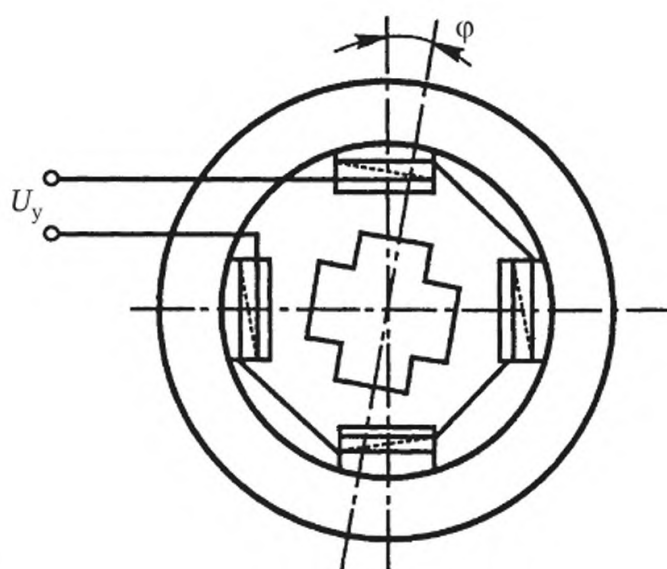


Рис. 12.4. Конструктивная схема шагового двигателя

Традиционной областью применения ШД являются малые и средние станки (например, электрофизические и финишные). Однако с появлением силовых ШД проявляется тенденция к отказу от использования усилителей крутящего момента (большой частью — гидравлических) и к расширению непосредственного использования ШД в кинематических цепях.

Кроме регулируемых двигателей постоянного тока и шаговых двигателей в качестве исполнительных устройств широко применяются и другие разновидности электрических двигателей. К ним в первую очередь относятся асинхронные электродвигатели переменного тока. Эти двигатели бывают однофазные, двухфазные и трехфазные, с короткозамкнутым ротором, с полым ферромагнитным ротором и с полым немагнитным ротором. В системах автоматики для отработки соответствующим образом преобразованной информации чаще всего в качестве исполнительных устройств используются асинхронные двухфазные электродвигатели переменного тока с полым немагнитным ротором.

Они обладают малым моментом инерции ротора, отсутствием скользящих токоподводов (щеток), что уменьшает момент трения и возникновение электромагнитных помех, способны к регулированию и реверсированию вращения, обеспечивают пропорциональность скорости вращения напряжению питания, характеризуются стабильностью при существенном изменении температуры окружающей среды, а также рядом других положительных свойств.

Кроме различных электродвигателей в качестве исполнительных устройств для систем переработки информации в машиностроении используются различные электромагнитные устройства. В основе этих устройств — тяговые электромагниты, фрикционные электромагнитные муфты, порошковые муфты. С их помощью строятся различные электроуправляемые гидравлические и пневматические клапаны, а также электроуправляемые муфты, используемые в кинематических цепях.

§ 12.3. Гидравлические исполнительные механизмы

Гидравлические исполнительные механизмы (гидроприводы) широко применяются в технологическом оборудовании механообработки, в частности в металлорежущих станках. Применение гидроприводов упрощает кинематику оборудования и позволяет повысить уровень его автоматизации.

В гидравлических исполнительных механизмах в качестве рабочей среды используют минеральные масла, снабженные антикоррозионными, антиокислительными и антиизносными присадками. Для масел, применяющихся в гидравлических исполнительных механизмах, характерны следующие параметры:

- плотность порядка 880 кг/м^3 ;
- кинематическая вязкость порядка $16,5 \dots 20,5 \text{ м}^2/\text{с}$ при $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- модуль упругости $(1,4 \dots 1,7) \cdot 10^3 \text{ МПа}$;
- температура застывания $-13 \text{ }^\circ\text{C}$;
- тепловое расширение $\Delta V = 0,7 \cdot 0,001 \cdot \Delta V_t$, где V — первоначальный объем, а Δt — повышение температуры в $^\circ\text{C}$;
- удельная теплоемкость $1,8 \dots 2,1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$;
- удельная теплопроводность $0,136 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$.

Гидроприводы различаются между собой по рабочему давлению, по способу регулирования, по организации циркуляции рабочей жидкости, по методам управления и контроля.

С точки зрения рабочего давления различают гидроприводы *низкого давления* (до $1,6 \text{ МПа}$), *среднего давления* ($1,6 \dots 6,3 \text{ МПа}$) и *высокого давления* ($6,3 \dots 20 \text{ МПа}$).

По способам регулирования различают гидроприводы с *объемным регулированием* и с *дроссельным регулированием*. В случае объемного регулирования скорость гидродвигателя изменяется за счет изменения

рабочего объема регулируемой гидромашины (насоса или двигателя). В случае дроссельного регулирования изменяется проходное сечение регулирующих устройств. Дроссельное регулирование обладает большим быстродействием по сравнению с объемным, но из-за присущих этому способу регулирования значительных потерь он применяется в основном в гидросистемах малой мощности (до 3...5 кВт).

В станкостроении наибольшее применение нашли гидроприводы с разомкнутой циркуляцией, когда рабочая жидкость из бака подается насосом в гидросистему, а затем из гидросистемы снова поступает в этот же бак. При замкнутой циркуляции масло, отработав в исполнительном органе, поступает непосредственно во всасывающую линию подающего насоса.

По решаемым задачам управления гидросистемы подразделяют на *цикловые, следящие, адаптивные и программные*. Цикловые гидросистемы, в свою очередь, разделяются на гидросистемы с управлением по пути, по давлению или по времени.

Все гидроаппараты, используемые для построения гидросистем в технологическом оборудовании машиностроения, можно классифицировать, как показано на рис. 12.5.

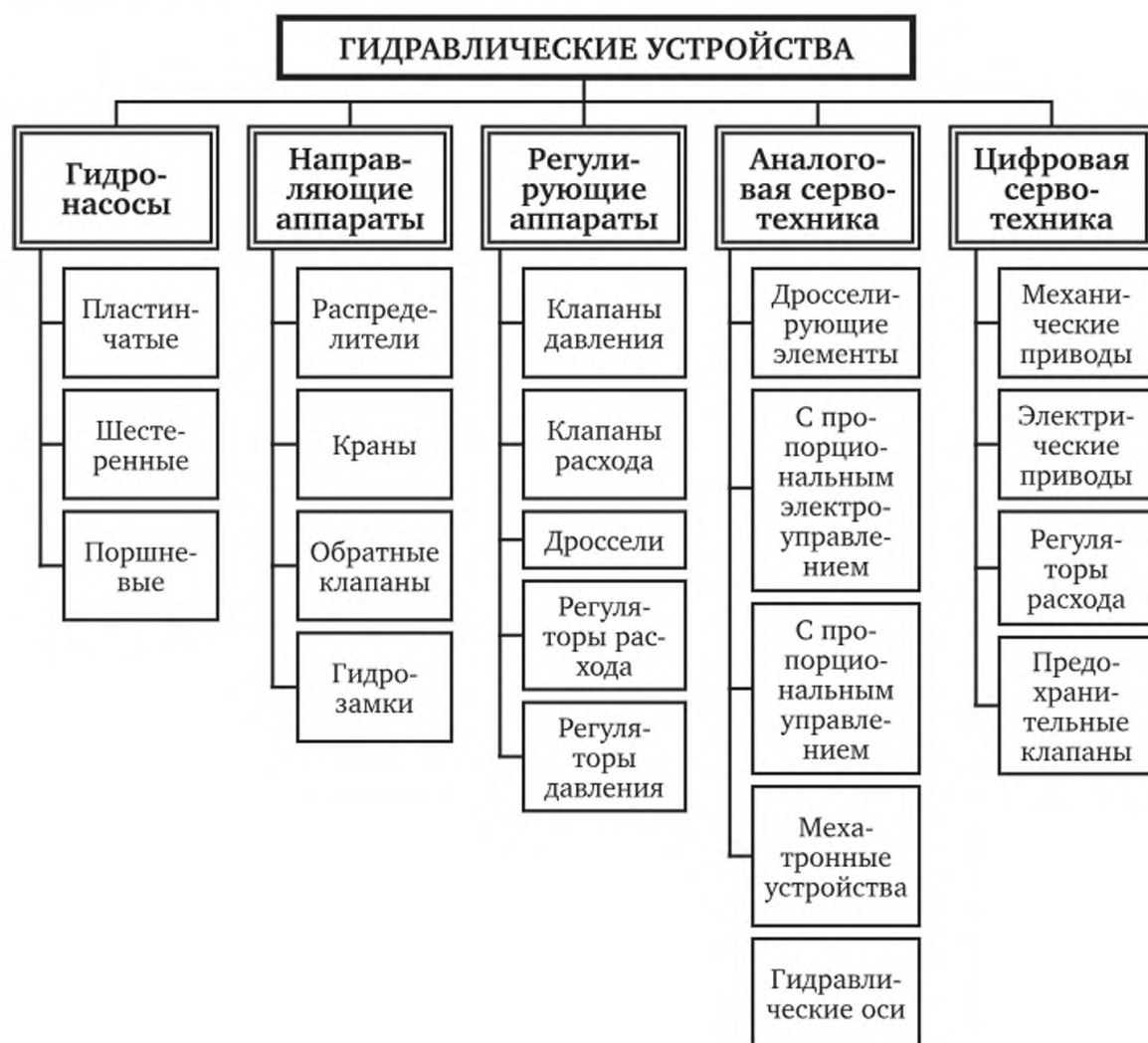


Рис. 12.5. Классификация устройств гидроаппаратуры

Пластинчатые насосы делятся на регулируемые и нерегулируемые, *шестеренные* — на насосы наружного зубчатого зацепления и внутреннего зубчатого зацепления, а *поршневые* — на радиально-поршневые и аксиально-поршневые насосы (в зависимости от того, как конструктивно располагаются рабочие цилиндры с поршнями — перпендикулярно оси вращения или вдоль нее).

Гидрораспределители могут быть с ручным, механическим, гидравлическим, электрическим и электрогидравлическим управлением.

Краны, как это следует из их определения, бывают только с ручным управлением, а обратные клапаны и гидрозамки — только с гидравлическим управлением.

Среди клапанов давления различают предохранительные, в том числе непрямого действия (регулируемые и нерегулируемые), напорные золотники, гидроклапаны с обратным клапаном, с электроразгрузкой и без нее, двух- и трехлинейные.

Клапаны расхода делятся на регуляторы расхода, регуляторы расхода с обратным клапаном, двух- и трехлинейные, регуляторы расхода с обратным клапаном и с распределителем.

Дроссели рекомендуются для определенного диапазона регулирования расхода в зависимости от рабочего давления. Выделяют также дросселирующие гидрораспределители с механическим управлением.

К гидравлическим устройствам аналоговой сервотехники относят дросселирующие гидрораспределители, которые применяются в высокودинамичных приводах, например, в электроэрозионных станках, а также используются в качестве усилителей момента в незамкнутых системах регулирования перемещений высокой точности. К ним относят также гидрораспределители с пропорциональным электроуправлением, которые используются в разомкнутых системах дистанционного управления вспомогательными механизмами и в замкнутых системах невысокой точности. Для этих же целей используются и регулирующие устройства с пропорциональным управлением. Для высокоточных систем регулирования давления, в том числе для испытательных стендов, применяются мехатронные пропорциональные гидроаппараты. Наконец, для привода вспомогательных механизмов сравнительно небольшой точности применяются так называемые гидравлические оси, где перемещение и исполнительного, и задающего органа является возвратно-поступательным.

Область применения дросселирующих гидрораспределителей существенно ограничивается необходимостью соблюдать высокие требования к чистоте рабочей жидкости, поэтому большее применение получила аппаратура с пропорциональным электроуправлением, которая способна работать вместе с обычными фильтрами. Пропорциональные гидрораспределители совместно с датчиками давления, расхода, а также датчиками положения исполнительного органа при микропроцессорном управлении насосами могут обеспечить практически любую регулировочную характеристику.

Однако вследствие существенной нелинейности расходной характеристики и трудностей, возникающих при регулировании и стабилизации малых расходов и давлений, применение пропорциональной гидроаппаратуры ограничено главным образом, разомкнутыми системами дистанционного управления.

Поскольку возможности аналоговой гидравлической сервотехники (как и любой аналоговой техники) принципиально ограничены дрейфом нуля и низкой помехоустойчивостью и надежностью, расширяется применение цифровой гидравлической сервотехники.

К устройствам цифровой гидравлической сервотехники относят ротационные и линейные приводы с механическим или электрическим управлением, а также управляемые регуляторы расхода и предохранительные клапаны. Управляемые цифровые гидравлические приводы различных типов применяются в технологическом оборудовании с ЧПУ средней точности, промышленных роботах, вспомогательных механизмах для регулирования скорости движения серводвигателей. Управляемые предохранительные клапаны применяются в основном для дистанционного программного изменения рабочего давления, например для изменения усилия зажима или для изменения давления рабочей жидкости в различного рода прессах.

В системах цифровой гидравлической сервотехники в качестве задатчиков обычно используются маломощные шаговые электродвигатели (ШД).

В системах с механической обратной связью по положению ШД во время движения рабочего органа постоянно вращается, причем максимальная скорость движения рабочего органа определяется максимальной пропускаемой частотой импульсов и «ценой» одного импульса.

В системах с электрической обратной связью ШД поворачивается на определенный угол, определяющий задание скорости движения рабочего органа. Максимальная скорость движения рабочего органа определяется в этом случае максимально допустимой периодичностью считывания информации измерительной системой. В хороших приводах с цифровой гидравлической сервотехникой при «цене» одного импульса 0,01 мм обеспечивается скорость перемещения до 80 м/мин.

Для построения типовых схем гидравлических систем широко используются типовые специальные гидравлические узлы. К ним относятся:

- вращающиеся гидроцилиндры, обычно используемые для зажима в патроне вращающихся шпинделей токарных станков с ЧПУ;
- гидроприводы уравнивания, позволяющие разгрузить приводы подач вертикально движущихся рабочих органов от действия силы тяжести и тем самым повысить их точность;
- гидроприводы зажимных механизмов, которые используются в машиностроении, в том числе для закрепления деталей на палетах, спутниках и поддонах;

- гидROPанели реверса, которые применяются главным образом в технологическом оборудовании с возвратно-поступательным движением.

В прецизионном оборудовании применение цифровой гидравлической сервотехники с электрической обратной связью открывает принципиально более широкие возможности, а именно:

- тонкое регулирование расхода непрерывно дозируемых рабочих жидкостей, поступающих в гидродвигатели большого рабочего объема, позволяет достичь высокой точности регулирования перемещений рабочих органов (точность перемещений оказывается при этом в пределах сотых долей микрометра);

- использование цифрового принципа преобразования и использования информации повышает надежность и помехоустойчивость, исключает дрейф нуля;

- совмещение в минимальном количестве деталей функций двигателя, направляющего устройства и контроля (например, с помощью лазерного интерферометра) предоставляет конструктору возможность оптимальной компоновки оборудования;

- использование «холодной» гидравлики позволяет обеспечить термическую стабилизацию.

Следует заметить, что в технологическом оборудовании помимо гидравлической сервотехники все большее применение находят гидростатические направляющие, где в зазор между поверхностями органов, перемещающихся друг относительно друга, под давлением подается рабочая жидкость, что исключает прямой контакт этих поверхностей. Использование достаточно жестких и точных гидростатических направляющих позволяет исключить механическое трение, обеспечить долговечность базирующих поверхностей, повысить геометрическую точность перемещений, а также обеспечить внутреннее демпфирование в подвижных соединениях и возможность сверхмалых коррекций положения и зажима.

§ 12.4. Пневматические исполнительные механизмы

Пневматические устройства являются эффективным средством автоматизации и механизации технологического оборудования в машиностроении. Это вытекает из свойственных им принципиальных преимуществ и проявляется в наибольшей степени при выполнении операций зажима и фиксации деталей, их кантовании, контроле линейных размеров, выполнении операций сборки, при транспортировке, очистке базовых посадочных поверхностей инструмента и деталей и др.

Принципиальными достоинствами пневматических устройств, делающими их в отдельных случаях незаменимыми, являются:

- простота конструкции и обслуживания;
- надежность работы;

- сохранение работоспособности в широком диапазоне температуры, влажности и запыленности;
- большой срок службы, достигающий 10...20 тыс. ч;
- высокие скорости перемещения исполнительных органов, достигающие для линейного движения 15 м/с, а для вращательного 20 тыс. об/мин;
- простота передачи энергоносителя (сжатого воздуха) на значительные расстояния;
- централизованный источник выработки энергии (обычно заводская компрессорная сеть);
- возможность торможения и остановки без риска повреждения механизма.

Недостатками пневматических устройств являются:

- невысокая скорость передачи сигналов, ограниченная скоростью звука в воздухе;
- трудности обеспечения плавности перемещения рабочих органов при колебаниях нагрузки;
- относительно высокая стоимость выработки сжатого воздуха.

В станкостроении и вообще в машиностроении используется пневматическая техника трех уровней давления: *высокого* (0,2...1,0 МПа), *среднего* (0,1...0,25 МПа) и *низкого* (0,001...0,01 МПа).

Под параметрами управляющего воздействия понимаются характеристики сигнала управления, такие как усилие, давление, электрические напряжение, мощность, сила тока, частота и сдвиг фазы и др.

В пневматических исполнительных двигателях происходит преобразование потенциальной энергии сжатого воздуха в механическую энергию движения поршня или ротора двигателя.

Наиболее широко применяемые типы пневматических исполнительных двигателей сведены в классификационную схему, приведенную на рис. 12.6.

Поршневые *пневмоцилиндры* в принципе могут иметь весьма широкий диапазон параметров; существуют ряды их типоразмеров, отличающихся диаметром самого цилиндра и штока, а также усилием на штоке. Типовой пневмоцилиндр для смягчения ударов в крайних положениях поршня имеет встроенные в крышки пневматические демпферы. Для торможения штока в промежуточном положении предусматриваются специальные пневмоуправляемые тормозные устройства, обычно размещаемые в штоковой крышке пневмоцилиндра.

Наиболее распространенным типом пневмодвигателя вращения является *пластинчатый* пневмомотор. Его конструктивная схема представлена на рис. 12.7. Пневмодвигатель включает в себя цилиндрические статор 1 и ротор 2, эксцентрично расположенный по отношению к статору. В пазах, выполненных параллельно оси ротора, перемещается несколько (в представленной схеме 4) пластин 3. Сжатый воздух подается внутрь статора через окно 4 и, отработав (переместив пластину 3), выходит из статора через окно 5.

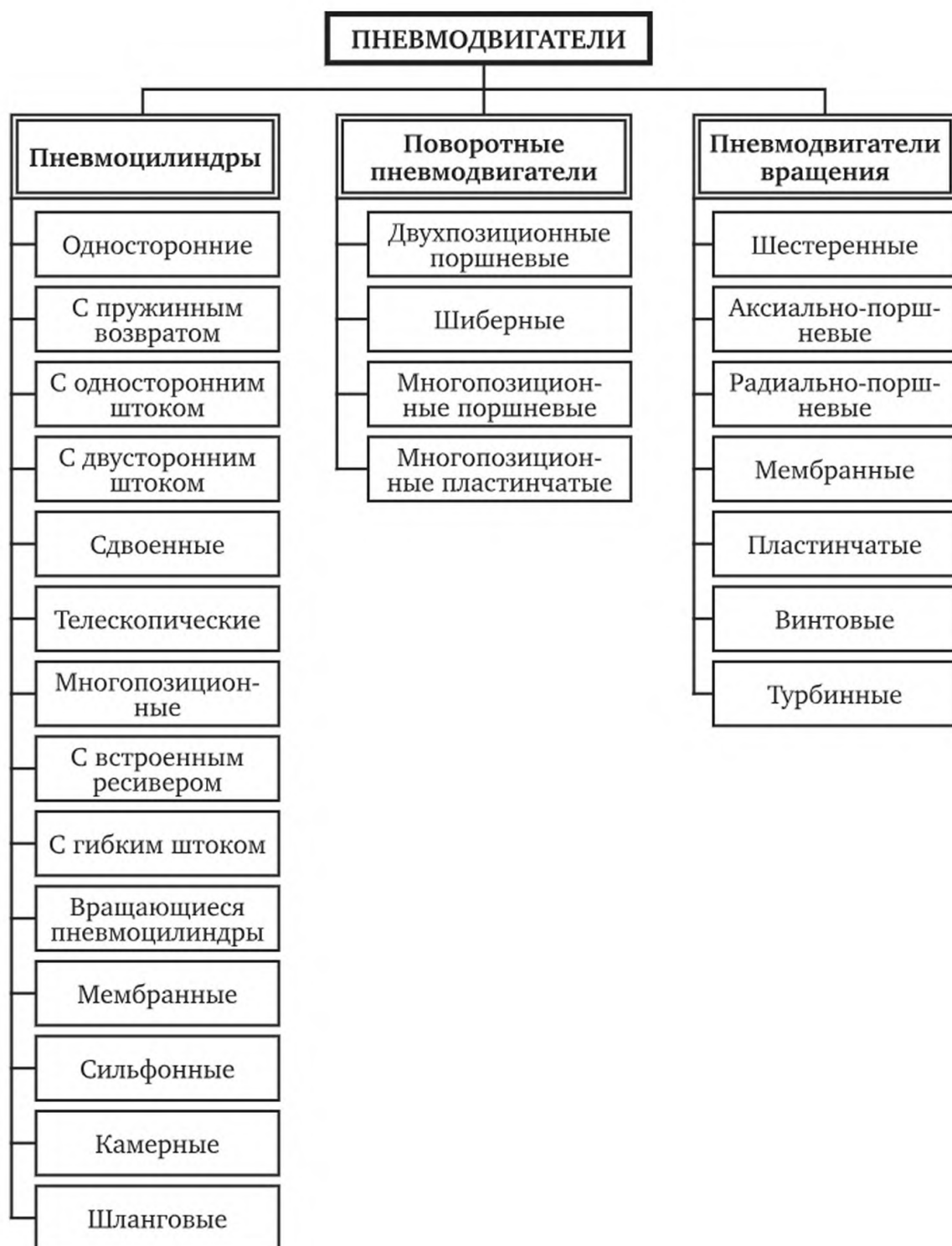


Рис. 12.6. Классификация основных типов пневмодвигателей

Подобный двигатель обычно развивает небольшой крутящий момент при значительной частоте вращения. Для увеличения выходного момента в него обычно встраивается одна или несколько ступеней планетарных редукторов. Для пневмодвигателей такого типа требуется обильная смазка, и в этом случае долговечность пластин может составлять 300...400 ч непрерывной работы. Диапазон скоростей вращения достаточно велик и лежит в пределах от 250 до 20 000 об/мин. Момент на валу при этом может лежать в пределах 0,12...20,0 Н · м.

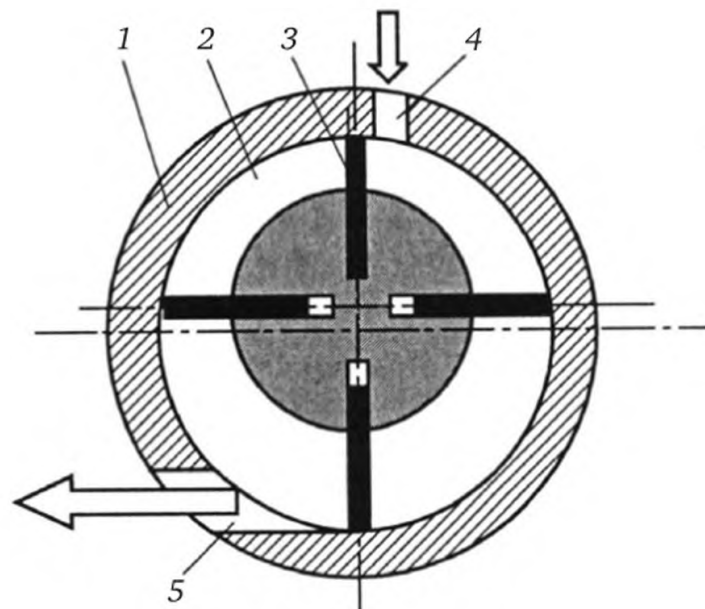


Рис. 12.7. Конструктивная схема пластинчатого пневмодвигателя вращения

Мембранные пневмодвигатели применяются в зажимных, фиксирующих, тормозных, прессующих и т. п. устройствах станков и другого технологического оборудования. К преимуществам мембранных пневмоприводов следует отнести относительно небольшую трудоемкость изготовления, высокую герметичность, отсутствие необходимости в подаче распыленной смазки. К недостаткам мембранных пневмоприводов следует отнести относительно небольшую величину хода, непостоянство развиваемого таким приводом усилия по ходу, сравнительно низкую долговечность. Следует иметь в виду, что мембрана в таком приводе может быть не только круглой, но и прямоугольной или иной формы.

Для использования различных пневматических исполнительных устройств необходимы также различные пневмогидравлические и пневмоэлектрические преобразователи. К ним относятся:

- *пневмовытеснители*, предназначенные для передачи энергии сжатого воздуха рабочей гидравлической жидкости без изменения давления;
- *пневмогидропреобразователи*, предназначенные для передачи энергии сжатого воздуха рабочей гидравлической жидкости с другими величинами давления;
- *пневмогидронасосы*, предназначенные для нагнетания рабочей жидкости в гидросистему, где она дальше работает, как это предусматривается гидросхемой;
- *пневмогидроаккумуляторы*;
- *реле давления*, предназначенные для выдачи электрического сигнала при достижении в пневматической системе заданного уровня давления (или разности давлений);
- *индикаторы давления*.

Сжимаемость воздуха является существенным фактором, который следует учитывать при проектировании исполнительных механизмов, работающих в условиях переменных нагрузок, например, в устройствах подачи для сверления и фрезерования. Обычно сжимаемость воздуха компенсируется путем включения в пневмопривод подачи гидравлических регуляторов скорости, как это показано на схеме рис. 12.8.

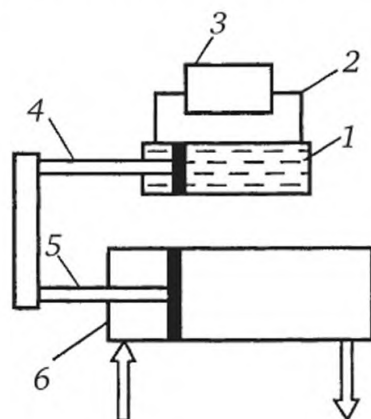


Рис. 12.8. Схема пневмопривода с гидравлическим регулятором скорости

Гидравлический регулятор представляет собой гидроцилиндр 1 с замкнутой циркуляцией рабочей жидкости (масла) и с регулируемым дросселем 3 в возвратном канале 2, служащим для регулирования расхода масла, однозначно определяющего скорость движения штока-толкателя 4, связанного со штоком 5 рабочего пневмоцилиндра 6.

Новые возможности использования пневматических устройств в качестве исполнительных механизмов возникают при их сочетании с устройствами переработки информации, основанными на микропроцессорной технике. Для таких устройств характерна тенденция к уменьшению объема преобразований информации, выполняемых собственно пневматической частью, и к перенесению максимума этих преобразований и соответствующих логических операций на переключательную цепь, реализованную на микроэлектронной схеме с высокой степенью интеграции.

Большинство из известных решений такого рода основано на применении тормозных устройств, обеспечивающих останов на заданной позиции. Имеются также решения, основанные на использовании следящих пневматических систем, где способность воздуха к сжатию так или иначе компенсируется.

Цифровой позиционный координатный пневмопривод может быть реализован различными способами. Например, он может быть построен на базе четырехкромочного следящего пневмораспределителя с шаговым управлением от системы ЧПУ.

Цифровой следящий пневмопривод позволяет:

- существенно расширить диапазон рабочих скоростей;
- достичь точности позиционирования в 0,05 мм за счет охвата конечного исполнительного органа обратной связью по положению;

- существенно повысить надежность за счет применения высоконадежных исполнительных механизмов (пневмоцилиндров), сквозной цифровой формы представления и обработки управляющих сигналов, а также исключения из привода промежуточных кинематических звеньев (например, винтовых передач), вносящих свои погрешности;
- обеспечить выполнение требований к сохранению окружающей среды вследствие экологической чистоты выхлопа пневмосистемы.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются исполнительные механизмы в зависимости от создаваемого ими перемещения?
2. Как классифицируются исполнительные механизмы по их физической природе?
3. Для каких задач применяются сервоприводы в станкостроении?
4. Какие основные требования предъявляются к координатным приводам подачи?
5. Какие основные требования предъявляются к приводам главного движения?
6. Какие основные требования предъявляются к приводам вспомогательных механизмов?
7. Что такое двухзонное регулирование?
8. Какие функции выполняют в станках вспомогательные механизмы?
9. Что такое рабочая характеристика двигателя исполнительного устройства?
10. Что такое механическая характеристика двигателя исполнительного устройства?
11. Что такое регулировочная характеристика двигателя исполнительного устройства?
12. Какая характеристика двигателя исполнительного устройства называется жесткой?
13. Какая характеристика двигателя исполнительного устройства называется мягкой?
14. Что является параметром при построении семейства кривых механических характеристик?
15. Что является параметром при построении семейства кривых регулировочных характеристик?
16. На какие разновидности делятся электрические сервоприводы по типу используемого базового двигателя?
17. На какие разновидности делятся электрические сервоприводы по способу выполнения силового преобразователя?
18. На какие разновидности делятся электрические сервоприводы по возможности изменения направления вращения?
19. Какие параметры отрабатываются в регулируемом электроприводе?
20. Какие параметры отрабатываются в следящем электроприводе?
21. Какие параметры отрабатываются в позиционном электроприводе?
22. Какие параметры отрабатываются в адаптивном электроприводе?
23. Как устроен электродвигатель постоянного тока и почему он нашел широкое применение в схемах автоматики?
24. Какие существуют способы взаимного соединения обмоток электродвигателя постоянного тока?
25. Какими способами можно регулировать обороты электродвигателя постоянного тока?

26. Что такое тиристор и каковы его характерные особенности?
27. Как работает и для чего применяется в схемах регулирования электродвигателей постоянного тока тиристорный преобразователь?
28. Что собой представляет тахогенератор и каковы его основные свойства?
29. Зачем в схемах регулирования электродвигателей постоянного тока применяется отрицательная обратная связь по скорости?
30. Зачем в приводах подач применяется отрицательная обратная связь по положению?
31. Как устроен и работает шаговый двигатель?
32. Каковы основные области применения шаговых двигателей в машиностроении?
33. Какие существуют разновидности схем управления на базе шаговых двигателей?
34. Какие существуют разновидности электродвигателей переменного тока, используемых в схемах автоматики?
35. Какие разновидности электромагнитных устройств, помимо электродвигателей, используются в схемах автоматики в качестве исполнительных?
36. Каковы основные характеристики рабочей жидкости в гидравлических сервоприводах?
37. Как классифицируются гидроприводы по рабочему давлению?
38. Как классифицируются гидроприводы по способу регулирования?
39. Как классифицируются гидроприводы по организации циркулирования рабочей жидкости?
40. Как классифицируются гидроприводы по способу управления?
41. На какие группы подразделяются все компоненты гидросистем?
42. Какие существуют разновидности гидронасосов и гидромоторов?
43. Как управляются гидрораспределители, краны, обратные клапаны и гидрозамки?
44. Какие существуют разновидности гидравлических дросселей?
45. Что относится к аналоговым устройствам гидравлической сервотехники?
46. Что относится к цифровым устройствам гидравлической сервотехники?
47. Какие новые возможности открываются с применением цифровой гидравлической сервотехники?
48. Что такое гидростатические направляющие?
49. Какие специфические требования предъявляются к гидростатическим направляющим?
50. Что является основными достоинствами пневматических сервосистем?
51. Что является основными недостатками пневматических сервосистем?
52. На какие группы делятся пневматические сервосистемы, применяющиеся в машиностроении?
53. Какие существуют разновидности пневмоцилиндров?
54. Каковы особенности построения пневмоцилиндров?
55. Какие существуют разновидности поворотных пневмодвигателей?
56. Какие существуют разновидности пневмомоторов?
57. Как устроены и какими характеристиками обладают пластинчатые пневмоприводы?
58. Каковы области преимущественного применения мембранных пневмоприводов?
59. Какие существуют разновидности пневмогидравлических и пневмоэлектрических преобразователей?
60. Как компенсируется сжимаемость воздуха в пневматических сервоприводах?
61. Какие возможности обеспечивает цифровой пневматический сервопривод?

Раздел III

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕХАНООБРАБОТКИ

Глава 13

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕХАНООБРАБОТКИ

§ 13.1. Принципы компенсации и отклонения

Знание информационных технологий в машиностроении дает возможность ответить на вопросы о том, как получается с различных объектов, воспринимается, перерабатывается и используется информация о параметрах тех или иных технологических процессов. Соответственно все информационные технологии в машиностроении можно разделить на три группы:

- получение и индикация информации о параметрах технологического процесса;
- получение, переработка и индикация переработанной информации о параметрах технологического процесса;
- получение и переработка информации о параметрах технологического процесса с последующим использованием полученных результатов для воздействия на технологический процесс.

Соответственно в первом случае следует говорить о различных *показывающих и регистрирующих приборах*. Примером могут служить измерительные и регистрирующие системы исследовательских стендов, в частности для построения так называемых круглограмм, т. е. диаграмм изменения сил резания в пределах одного оборота заготовки при точении или круглом шлифовании.

Во втором случае следует говорить о *системах первичной обработки информации* с последующей индикацией и/или регистрацией переработанной информации. Примером могут служить системы статистической обработки результатов контроля и разбраковки, применяемые в массовом производстве, характерном, скажем, для автомобильной промышленности или производства боеприпасов. Другим примером могут служить устройства автоматического контроля отверстий, расточенных под подшипники в корпусах различных редукторов. В этих устройствах арифметической обработке (нахождению средних значений) подвергаются результаты замеров расточенных отверстий, выполненных по взаимно перпендикулярным диаметрам и в различных сечениях по длине расточенного отверстия.

В третьем случае следует говорить об *автоматических системах управления технологическими процессами* (различного рода и уровня автоматизации АСУ ТП). Примером могут служить системы программного управления, в том числе числового программного управления станками (системы ЧПУ), системы управления копировальными станками (гидравлические и электрические), системы, воспроизводящие изменение какой-либо задающей величины (так называемые системы электрического вала или гидравлической оси), а также системы поддержания заданного значения той или иной величины (системы стабилизации параметра).

В данном разделе настоящей книги рассматриваются именно *принципы использования* полученной, принятой и переработанной информации о ходе рабочего процесса, применяемые в технологии машиностроения.

Основные принципы использования полученной, принятой и переработанной информации можно разделить на четыре группы:

- регулирование по возмущению;
- регулирование по отклонению;
- комбинированное регулирование;
- регулирование с самообучением и самоорганизацией.

Заметим, что в любой системе автоматического регулирования (САР) выход $Y(t)$ объекта регулирования (ОР) является входом $X(t)$ регулирующего устройства или просто регулятора (Р), а выход регулятора подается на вход объекта регулирования. Это показано на рис. 13.1.

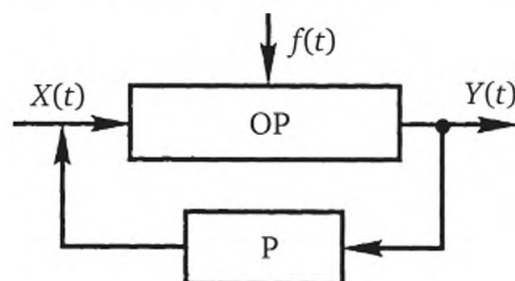


Рис. 13.1. Структура САР

На объект регулирования ОР действуют неподконтрольные воздействия $f(t)$, искажающие его поведение и называемые *возмущающими воздействиями*. В результате возмущающих воздействий параметры на выходе объекта регулирования отклоняются от требуемых значений. Для того чтобы хотя бы часть этих параметров, несмотря на возмущающие воздействия, оставалась в требуемых пределах, к объекту регулирования прилагаются определенным образом выработанные воздействия, называемые *управляющими воздействиями*. Те величины, на которые можно влиять, подавая те или иные управляющие воздействия, называются *регулируемыми параметрами*.

Принцип, используемый для регулирования, определяет, как и на основании какой информации формируется управляющее воздействие на объект регулирования.

Первым из названных выше принципов является так называемый принцип регулирования *по возмущению*, называемый также принципом *Понселе — Чиколева*. Сущность этого принципа состоит в том, что из различных возмущений, действующих в системе, выбирается одно, главное (иногда — несколько заранее известных возмущений). В этом случае система регулирования компенсирует только воздействие выбранного параметра (или нескольких заранее выбранных параметров), и управляющее воздействие вырабатывается на основании результатов измерений этого параметра (или этих параметров).

Структурная схема системы регулирования, реализующей этот принцип, приведена на рис. 13.2. В соответствии с этим принципом измеренное возмущение $f(t)$ складывается в определенной пропорции с заданным значением $G(t)$ входного параметра, так что фактическое значение этого выходного параметра $Y(t)$ остается соответствующим заданному, несмотря на возмущение. Принцип компенсации возмущений называют также регулированием по нагрузке, так как для поддержания, например, постоянного напряжения генератора управляющее воздействие определяется изменением нагрузки. В случае регулирования оборотов генератора возмущающим воздействием является изменение тока нагрузки. Это возмущающее воздействие измеряется обмоткой управления, включенной последовательно в цепь нагрузки. Эта обмотка используется также для оказания управляющего воздействия на объект регулирования (генератор) путем дополнительного изменения его потока возбуждения. При увеличении тока нагрузки поток возбуждения генератора также увеличивается и в определенной мере компенсирует увеличение нагрузки, предотвращая падение напряжения, вырабатываемого генератором.

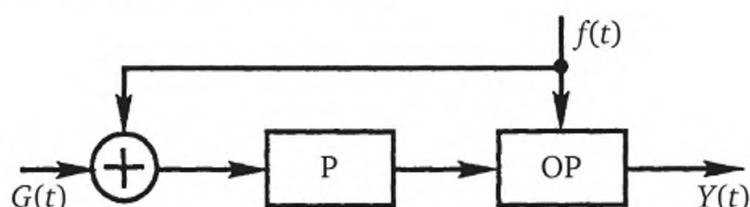


Рис. 13.2. Схема регулирования по возмущению

Говорят, что в этом случае система автоматического регулирования является инвариантной (независимой) по отношению к конкретному возмущающему воздействию, а именно к величине тока нагрузки. При таком принципе регулирования нет необходимости дожидаться, когда регулируемый параметр заметным образом изменится, т. е. регулирование осуществляется без запаздывания по отношению к возмущающему воздействию. Однако здесь возникает необходимость априорного выделения именно того возмущающего воздействия, которое оказывает определяющее влияние на регулируемый параметр, и отсутствует обратная связь по результатам осуществленной компенсации возмущений.

Последний из названных недостатков отсутствует в схеме, реализующей принцип регулирования *по отклонению*, называемый также принципом *Уатта — Ползунова*. Структурная схема системы автоматического регулирования, использующей этот принцип, приведена на рис. 13.3.

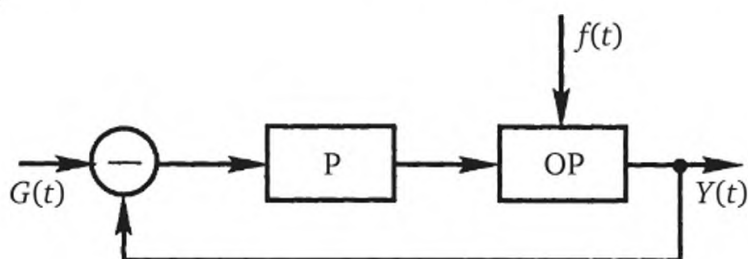


Рис. 13.3. Схема регулирования по отклонению

В соответствии с этим принципом фактическое значение регулируемого параметра $Y(t)$ сравнивается (вычитается) с его заданным значением $G(t)$. Полученное таким образом отклонение фактического значения регулируемого параметра от его заданного значения поступает на регулятор и, далее, порождает управляющее воздействие, подающееся на объект регулирования.

Положительной стороной такого принципа регулирования является поддержание регулируемого параметра в требуемых пределах независимо от того, какими возмущениями вызвано его отклонение от заданной величины. Этот принцип получил свое название потому, что его применил в своей паровой машине Джеймс Уатт, построив центробежный регулятор оборотов. В этом регуляторе при изменении числа оборотов вала паровой машины независимо от причин, вызвавших это изменение, под воздействием центробежной силы менялось положение грузиков, перемещающих скользящую муфту, изменяющую подачу пара в машину. Таким образом, после падения (или увеличения) числа оборотов автоматически принимались меры по его увеличению (или уменьшению).

Свойство этого принципа регулирования особенно важно и полезно, когда объект регулирования подвержен воздействию многих не известных заранее возмущений с неизвестными точками их приложения. С другой стороны, процесс регулирования здесь начинается только после того, как произойдет отклонение регулируемого параметра, которое должно быть устранено самим процессом регулирования.

Для автоматических систем высокой точности и повышенного быстродействия обычно используют *комбинированное* регулирование, сочетающее в себе достоинства обоих рассмотренных принципов регулирования. Структурная схема, соответствующая комбинированному регулированию, изображена на рис. 13.4.

При такой схеме действие неучтенных возмущений в какой-то мере ослабляется контуром регулирования по отклонению, а возмущающее действие изменения нагрузки сразу же компенсируется изменением управляющего воздействия.

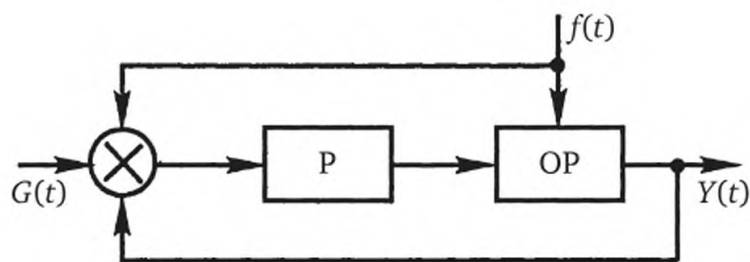


Рис. 13.4. Схема комбинированного регулирования

В современных системах автоматического регулирования используется принцип адаптации (приспособления) к изменяющимся условиям работы. Такие адаптирующиеся системы делят на системы с самонастройкой программы работы, с изменением параметров и с изменением структуры.

Для оценки работы объекта регулирования часто используют такие показатели качества, или, как их часто называют, критерии оптимальности, как минимум расхода энергии на единицу продукции, максимум КПД, максимум производительности и др.

§ 13.2. Замкнутые, разомкнутые и другие системы автоматизации

Системы, использующие в различных технических объектах переработанную информацию и построенные на различных принципах автоматического регулирования, делятся на *замкнутые* и *разомкнутые* в зависимости от характера взаимодействия регулятора и объекта регулирования.

В разомкнутых системах обеспечивается требуемое (запрограммированное заранее, соответствующее изменению некоторой произвольной величины или же постоянное, стабилизированное) значение регулируемого параметра путем непосредственной подачи управляющего воздействия на объект управления независимо от результатов этого воздействия. Работа такой системы не зависит, таким образом, от того, насколько правильным или успешным было это воздействие. Примером может служить привод координатных перемещений, осуществляемый шаговым двигателем. В идеале величина перемещения исполнительного органа (например, суппорта токарного станка) должна равняться общему числу импульсов, поступивших на вход этого двигателя, а скорость перемещения должна соответствовать частоте поступления импульсов и меняться вместе с изменением этой частоты. Однако практически вследствие наличия погрешностей в кинематической цепи, связывающей шаговый двигатель с исполнительным органом, такого соответствия может и не быть, что особенно проявляется при реверсировании движения. Кроме того, некоторые импульсы могут быть «проглочены» шаговым двигателем, т. е. система управления выдаст на двигатель положенное число импульсов, а его вал повернется на меньший, чем требовалось, угол. Поэтому отсутствие информации

о результатах воздействия на объект управления является принципиальным недостатком разомкнутых систем управления и может привести к большим отклонениям регулируемого параметра от требуемого значения. Но это же в ряде случаев является достоинством таких систем, так как в них управляющее воздействие подается на объект регулирования сразу, не дожидаясь, когда регулируемый параметр отклонится от требуемого значения.

Если источником управляющих воздействий в разомкнутых системах является человек, то такая система называется *автоматизированной*. Если источником управляющих воздействий в разомкнутых системах служит какое-либо задающее устройство, либо параметры внешней среды, то такая система является *автоматической*. Разомкнутая система является по своей структуре простейшей системой автоматического или автоматизированного управления.

Противоположностью разомкнутым системам являются замкнутые системы, в которых осуществляется двустороннее взаимодействие регулятора и объекта управления. Здесь существует два потока информации — прямой и обратный. Прямой поток информации соответствует управляющему воздействию регулятора на объект, а обратный поток — воздействию объекта управления на регулятор, что, собственно, и называется обратной связью. Фактическое текущее значение регулируемого параметра сравнивается с заданным, и полученный таким образом сигнал ошибки используется для модулирования потока энергии от внешнего источника и формирования управляющего воздействия.

Очевидно, что системы, использующие принцип регулирования по возмущению, являются разомкнутыми системами, а использующие принцип регулирования по отклонению — замкнутыми.

Системы, использующие информацию для задач управления тем или иным технологическим или исследовательским объектом в машиностроении, по их принципиальной структуре можно подразделять и далее, что показано на классификационной схеме рис. 13.5.

Как замкнутые, так и разомкнутые системы могут быть разделены на системы *прямого* и *непрямого* действия.

Системы прямого действия формируют управляющее воздействие за счет энергии регулируемого параметра, а системы непрямого действия — за счет энергии дополнительного внешнего источника.

В зависимости от вида используемой внешней энергии системы непрямого действия могут быть разделены на *электрические*, *гидравлические*, *пневматические* и *комбинированные*.

В зависимости от характеристик элементов, из которых строятся автоматические системы, их делят на *линейные* и *нелинейные*. Линейными называют такие системы, у которых зависимость между установившимися значениями выходных и входных параметров представляет собой прямую линию (пропорциональная зависимость), а динамические (переходные) процессы описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Нелинейные

системы характеризуются нелинейными зависимостями между установившимися значениями входных и выходных величин, а также нелинейными дифференциальными уравнениями, описывающими переходные процессы. Фактически все реальные процессы и системы являются нелинейными, хотя отклоняются от идеального линейного представления в различной степени. Для задач исследования и описания реальные нелинейные математические модели процессов и устройств часто *линеаризуют*, т. е. по известным правилам, не забывая при этом о возникающих погрешностях, заменяют приближенными к ним линейными моделями.

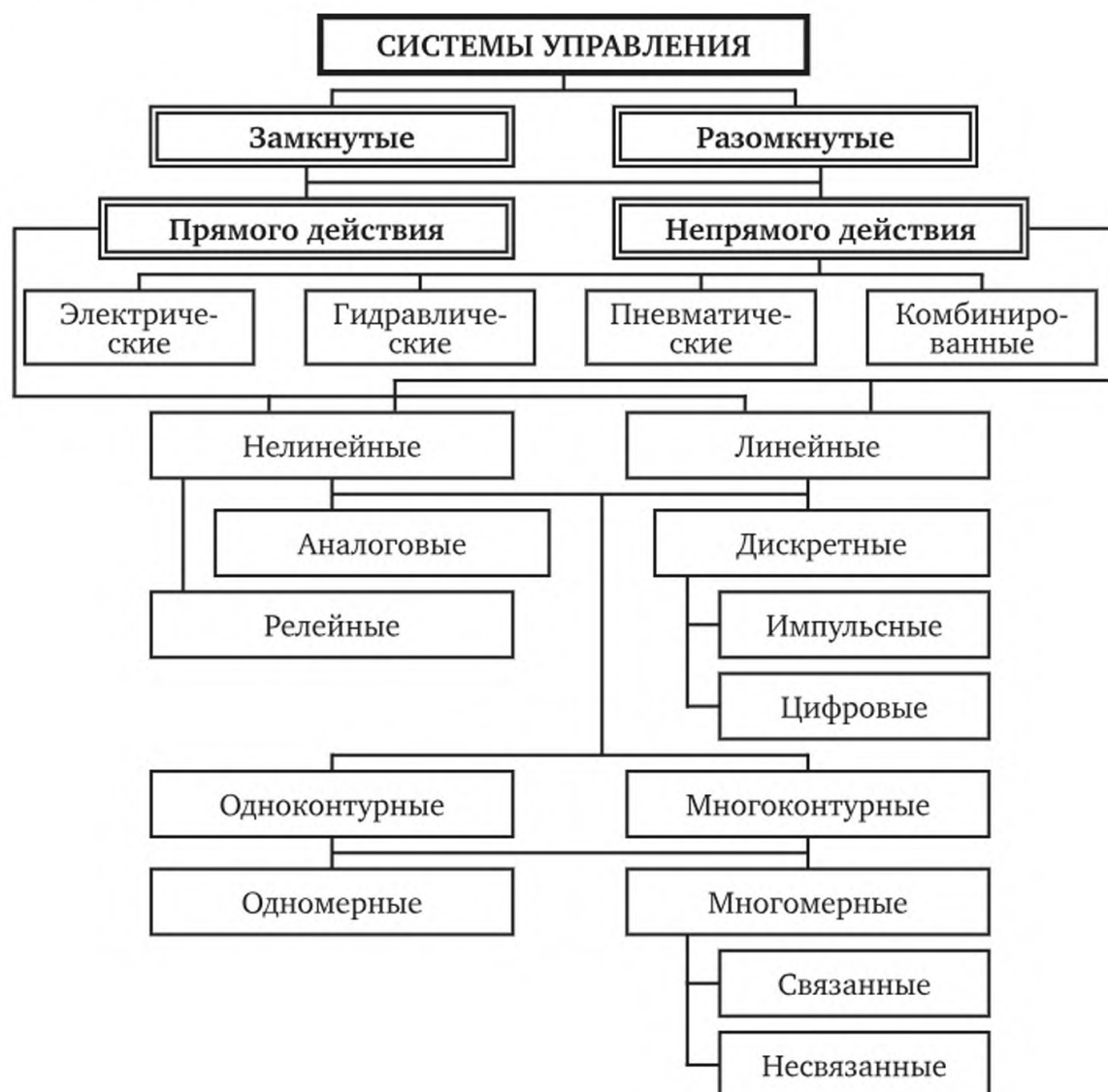


Рис. 13.5. Классификационная схема систем автоматического управления

По виду зависимости между входной и выходной величинами элементов, входящих в автоматические системы, их делят на *аналоговые* и *дискретные*. Заметим, что если в системе есть хотя бы один дискретный элемент, т. е. такой элемент, у которого плавному изменению входной величины будет соответствовать скачкообразное (дискретное), или, как говорилось выше, квантованное изменение выходной

величины, то вся система будет относиться к дискретным. Как линейные, так и нелинейные системы могут быть и аналоговыми, и дискретными, но не любыми дискретными, а только теми, у которых величина того или иного параметра изображается числом или серией импульсов (унитарным кодом). Если же система или какой-либо ее элемент обладает *релейным* выходом, то вся эта система должна быть отнесена к релейным и считаться нелинейной системой. Примером нелинейной системы такого рода с релейным воздействием может служить система поддержания температуры в закалочной термопечи, с включением или выключением (в зависимости от результатов измерения) нагревательного элемента.

В зависимости от их структуры все автоматические системы делят на *одноконтурные* и *многоконтурные*. Под контуром в структурной схеме системы понимается замкнутый участок цепи, образованный элементами схемы и различного рода прямыми и обратными связями, существующими в этой схеме. Одноконтурные системы имеют лишь одну обратную связь. Многоконтурные системы имеют несколько прямых и обратных связей, каждая из которых образует свой замкнутый контур. Примеры одноконтурной и двухконтурной систем приведены на рис. 13.6. Многоконтурные системы по сравнению с одноконтурными при прочих равных условиях обладают лучшими динамическими свойствами, но они значительно сложнее для описания и анализа.

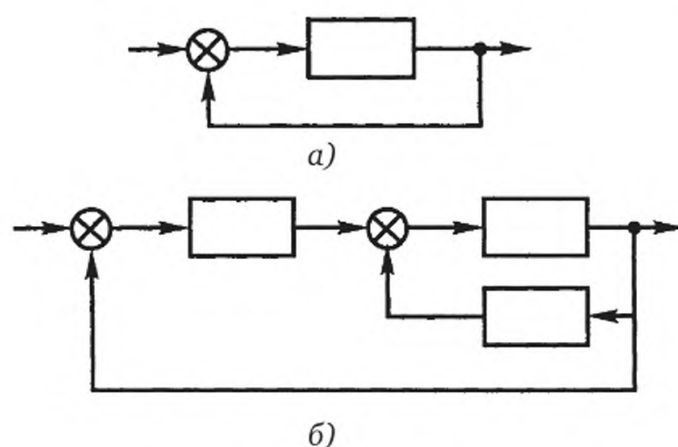


Рис. 13.6. Одноконтурная (а) и двухконтурная (б) автоматические системы

В зависимости от числа регулируемых параметров автоматические системы делятся на *одномерные* и *многомерные*.

Многомерные системы, в свою очередь, могут быть разделены на системы *связанного* и *несвязанного* управления. Системы несвязанного управления характеризуются тем, что регуляторы каждого параметра непосредственной связи между собой не имеют, и их взаимодействие осуществляется только через объект управления. В системах связанного управления регуляторы отдельных параметров, кроме того что они взаимодействуют через общий для них объект управления, также и непосредственно связаны друг с другом.

§ 13.3. Статические и астатические, устойчивые и неустойчивые системы автоматизации

Одним из основных требований к любой технической системе является ее устойчивость. Под устойчивостью системы понимается ее способность после приложения воздействия, выведшего ее из положения равновесия, приходить в результате соответствующего переходного процесса в новое установившееся состояние. Однако это новое установившееся состояние для разных типов систем может быть различным. Различным может быть и переходный процесс, который переводит систему в это новое устойчивое состояние.

Все автоматические системы, использующие информацию датчиков о параметрах технологических процессов для воздействия на этот технологический процесс, можно разделить на три группы:

- системы автоматической стабилизации;
- системы программного управления;
- следящие системы.

Эти разновидности автоматических систем отличаются принципиально, как принципиальными являются и различия в методах их анализа. Разница состоит лишь в том, как задается и изменяется во времени *уставка*, определяющая характер регулируемого параметра процесса или устройства.

В *системах автоматической стабилизации* значение регулируемого параметра поддерживается постоянным независимо от изменения нагрузки и от других возмущающих воздействий. Характерным примером может служить закалочная печь, температура в которой должна поддерживаться на заданном уровне независимо от массы закаливаемых деталей и их расположения в печи, их начальной температуры, температуры окружающей среды и других возмущающих воздействий. Другим примером, характерным для машиностроения, может служить система поддержания постоянства оборотов электродвигателя независимо от нагрузки. Мы уже знаем, что такая характеристика привода в целом (т. е. двигателя вместе со связанной с ним схемой) называется жесткой. Колебания нагрузки всегда возникают вследствие различных условий смазки направляющих, использования многолезвийного инструмента (фрезы) и др.

В *системах программного управления* значение регулируемого параметра задается другим параметром, изменение которого заранее предписано (запрограммировано). Примером такой системы может служить, в частности, числовое программное управление (ЧПУ), где изменение регулируемого параметра, которым является положение рабочего органа станка, скажем, суппорта или рабочего стола, задается программой его перемещения, заданной заранее в виде организованного определенным образом набора чисел, называемого управляющей программой (УП). Температура в закалочной печи также может

не оставаться постоянной, а, например, сначала подниматься, затем, достигнув заданного значения, в течение определенного времени поддерживаться постоянной, после чего быстро снижаться до температуры «выстоя», некоторое время оставаться неизменной при этом значении, а затем быстро падать до температуры окружающей среды. График такого изменения температуры показан на рис. 13.7.

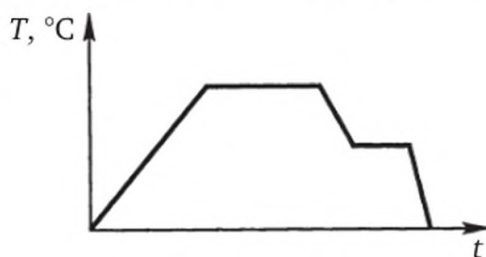


Рис. 13.7. Пример программы изменения температуры

Наконец, изменение регулируемого параметра может происходить в соответствии с изменением другого параметра, изменение которого заранее не predetermined. Примером такой системы, которая «следит» за изменением задающего параметра, может служить сервоусилитель рулевого управления, применяемый на тяжелых грузовиках, автобусах и легковых автомобилях высокого класса. Другим примером может служить усилитель мощности в разомкнутых системах, где задатчиком является маломощный шаговый двигатель, уже описанный выше. Различного рода копировальные станки, характерным примером которых являются гидрокопировальные токарные полуавтоматы, также можно рассматривать как технические системы, в которых перемещение поперечного суппорта отслеживает перемещение щупа (копира),двигающегося по шаблону, изображающему осевое сечение обрабатываемой в данный момент детали.

Границы между этими типами систем являются весьма условными. Так, например, гидрокопировальный токарный автомат, который относится к автоматическим устройствам следящего типа, может также считаться и устройством программного управления, в котором программа обработки конкретной детали задается не в виде набора чисел, а в виде материального копира (шаблона), изготовленного из легко обрабатываемого материала (обычно алюминиевого сплава).

По характеру зависимости между новым установившимся значением регулируемого параметра и величиной воздействия на объект управления все автоматизированные системы могут быть разделены на так называемые *статические* и *астатические*.

В статических системах различным значениям возмущающего воздействия соответствуют свои отклонения регулируемого параметра от его заданного значения. Например, при изменении нагрузки на валу электродвигателя, он, как говорят, «садится» под нагрузкой, т. е. его обороты падают, причем тем больше падают, чем значительно возросла нагрузка.

В астатических системах равновесие, если оно обеспечивается вообще, может быть достигнуто только при единственном значении регулируемого параметра независимо от величины возмущающего воздействия.

Примеры статической и астатической систем, предназначенных для решения одной и той же задачи, а именно регулирования уровня жидкости, приведены соответственно на рис. 13.8 и 13.9.

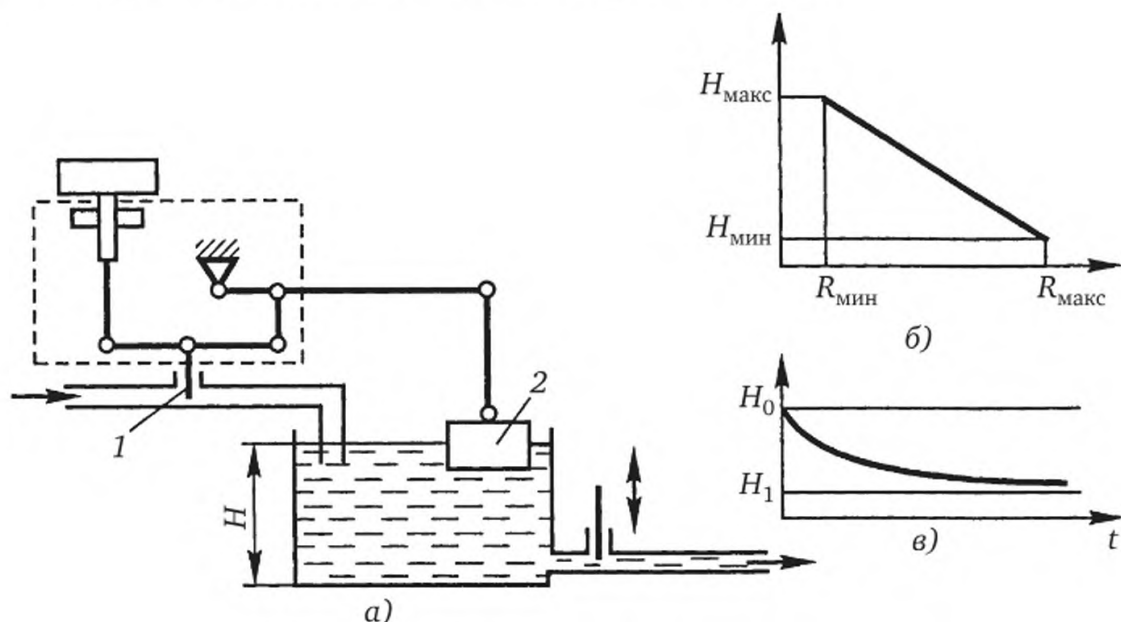


Рис. 13.8. Конструктивная схема, статическая характеристика и переходный процесс статической системы

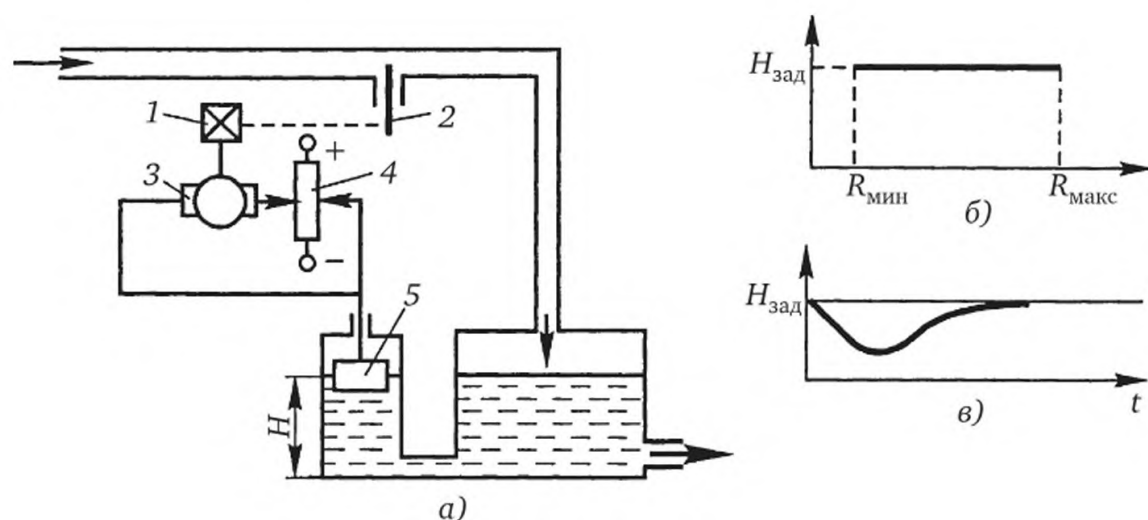


Рис. 13.9. Конструктивная схема, статическая характеристика и переходный процесс астатической системы

В статическом регуляторе уровня жидкости, конструктивная схема которого приведена на рис. 13.8, а, поплавков, измеряющий уровень жидкости в резервуаре, кинематически однозначно связан с задвижкой, которая может изменять величину притока жидкости в этот резервуар.

Нагрузкой в данном случае является величина стока из этого резервуара, которая может изменяться заранее не известным образом, хотя и в установленных пределах. Например, именно так устроен и работает применяющийся в подавляющем большинстве автомобильных карбюраторов регулятор уровня бензина в поплавковой камере. В установившемся режиме в таком регуляторе величины притока и стока жидкости должны быть равны. Поэтому если изменился сток, то должен измениться и приток, что может быть обеспечено только при новом положении регулирующей задвижки 1, а, значит, и при новом положении поплавка 2 и соответственно новом значении уровня жидкости (регулируемого параметра). Таким образом, каждому значению нагрузки в этой системе будет соответствовать свое определенное значение регулируемого параметра. Статическая характеристика, т. е. зависимость выходной величины от нагрузки, в данном случае будет линейной, а именно: при изменении нагрузки от $R_{\text{мин}}$ до $R_{\text{макс}}$ регулируемый параметр изменяется от $H_{\text{макс}}$ до $H_{\text{мин}}$. Соответствующая статическая характеристика приведена на рис. 13.8, б, а один из вариантов переходного процесса статической системы приведен на рис. 13.8, в.

Примером астатической системы может служить электрическая система регулирования уровня жидкости непрямого действия. Конструктивная схема такой системы приведена на рис. 13.9, а, ее статическая характеристика показана на рис. 13.9, б, а один из вариантов переходного процесса показан на рис. 13.9, в. В отличие от ранее рассмотренной схемы в данной системе поплавков 5 не влияет непосредственно на положение регулирующей заслонки, а управляет положением ползунка реостата 4, от которого питается цепь якоря регулируемого двигателя постоянного тока 3 с независимым возбуждением, перемещающего через соответствующую кинематическую цепь 1 регулируемую заслонку 2. При изменении величины стока уровень жидкости отклонится от заданного положения, поплавков также изменит свое положение, ползунок реостата сместится из среднего положения и регулируемый электродвигатель будет вращаться, пока ползунок реостата не вернется в среднее положение, т. е. пока независимо от величины стока уровень снова не достигнет заданного значения. Таким образом, при любом значении величины стока электродвигатель не будет вращаться, и, следовательно, система будет находиться в положении равновесия только, если ползунок реостата находится в среднем положении и уровень жидкости будет в точности равен заданному.

В любой автоматической системе, будь то статическая или астатическая, главнейшим требованием является ее устойчивая работа. Под *устойчивостью* автоматической системы понимают ее способность приходить в новое состояние равновесия после приложения воздействия, которое вывело ее из старого состояния равновесия. Вопрос заключается в том, как протекает переходный процесс, а это, в свою очередь, определяется свойствами самой системы и свойствами приложенного воздействия. Поэтому устойчивую систему можно также опре-

делить как систему, в которой переходные процессы являются затухающими.

В *устойчивой* системе переходный процесс может быть *апериодически* сходящимся, т. е. изображаться кривой, монотонно приближающейся к новому установившемуся значению регулируемого параметра. Он может быть также *колебательно сходящимся*, когда регулируемый параметр принимает в конце концов новое установившееся значение после ряда постепенно уменьшающихся по амплитуде, иначе говоря, затухающих колебаний.

Наоборот, в *неустойчивой* системе переходный процесс является *апериодически расходящимся* или *расходящимся колебательно*. В последнем случае колебания регулируемого параметра со временем не только не затухают, а, наоборот, возрастают, и система, как говорят, «идет вразнос».

Граничным является случай, когда колебания регулируемого параметра не затухают и не возрастают, а остаются постоянными. В этом случае, если не принимать специальных мер, колебания не могут существовать в течение сколько-нибудь длительного времени, так как незначительного изменения параметров системы достаточно, чтобы колебания в ней затухли или стали возрастать. В случае же стабилизации колебательного процесса с течением времени система является тем, что называется *генератором колебаний*. Генератор, выдающий колебания регулируемой «звуковой», т. е. достаточно низкой, частоты, является одним из типовых устройств, применяющихся как для проведения анализа технических систем, так и для управления ими.

Для исследования устойчивости автоматических систем применяют как *прямой*, так и *косвенный* методы. При *прямом* методе переходный процесс в системе определяется либо экспериментально, что не всегда возможно в реальных условиях, либо расчетным путем, что является трудоемким. Полученные расчетом результаты все равно требуют последующей экспериментальной проверки на моделях или на самом объекте.

Поэтому для анализа автоматических систем широко используют *косвенные* методы. Они основываются на использовании для суждения об устойчивости системы ряда признаков без решения описывающих данную систему или ее модель дифференциальных уравнений и без построения экспериментальных или расчетных графиков переходных процессов.

Эти признаки называют *критериями устойчивости*. Критерии устойчивости делятся на *алгебраические* и *частотные*.

Алгебраические критерии позволяют судить об устойчивости системы путем выполнения определенных алгебраических операций над коэффициентами исходного дифференциального уравнения системы или ее модели.

При использовании *частотных* критериев устойчивость системы оценивается по виду частотных характеристик, т. е. на основе анализа изменений свойств системы при изменении частоты ее колебаний.

Устойчивость системы может быть обеспечена с некоторым запасом, характеризующим сохранение ею устойчивости при изменении внешних условий (разумеется, в определенных пределах). В таком случае говорят о *степени устойчивости* данной системы.

§ 13.4. Корректирующие устройства в системах автоматизации

Понятие устойчивости или неустойчивости автоматической системы определяет только факт затухания колебаний в системе. Однако и при наличии затухания переходный процесс в системе может происходить различным образом, что определяется *показателями качества переходного процесса*. Существуют различные методы обеспечения требуемого качества переходного процесса в динамических системах.

Удобным методом обеспечения устойчивости системы и получения требуемого качества переходного процесса является введение в ее схему так называемых *корректирующих звеньев*. Эти устройства представляют собой компоненты со специально подобранными динамическими характеристиками, а их конструкция позволяет независимо от других элементов схемы достаточно просто изменять их параметры. Типы и способы включения таких звеньев могут быть различными в зависимости от того, что именно в системе необходимо исправить. В зависимости от способа их включения в общую схему системы управления различают *последовательные* и *параллельные* корректирующие звенья.

Последовательные корректирующие звенья, как это следует из их названия, включаются в цепь основного воздействия последовательно и преобразуют сигнал рассогласования в производную или в интеграл по времени от величины этого рассогласования.

Если последовательно включается дифференцирующее корректирующее звено, то этим увеличивается скорость воздействия на автоматическую систему. Однако, чтобы отработать такое форсированное воздействие, требуется большая мощность исполнительного механизма, а если выходом всей системы является механическая величина, то необходимо обеспечить и большую прочность всех компонентов системы.

Если последовательно включается интегрирующее звено, то со временем величина отклонения должна быть сведена к нулю. Это значит, что в такой системе устраняется статическая ошибка, а значит, и вся система должна быть теперь отнесена к астатическим.

Практически в электрических цепях автоматических систем в качестве последовательных корректирующих звеньев используются пассивные (т. е. не имеющие собственных внутренних источников энергии) RC-контуры. Схема такого корректирующего электрического RC-контура приведена на рис. 13.10.

В соответствии с законом Кирхгофа сумма входного напряжения $U_{вх}$, падения напряжения на емкости U_c и падения напряжения на рези-

стороне U_R , равного выходному напряжению $U_{\text{вых}}$, должна равняться нулю. Но поскольку заряд конденсатора $Q = C U_{\text{вх}}$, то, дифференцируя по времени обе части этого равенства и учитывая постоянство величины электрической емкости C , получим

$$I = dQ/dt = CdU_{\text{вх}}/dt.$$

Тогда $U_{\text{вх}} = IR = RC dU_{\text{вх}}/dt$, т. е. выходное напряжение такого контура оказывается пропорциональным скорости изменения его входного напряжения, что и соответствует первой производной по времени.

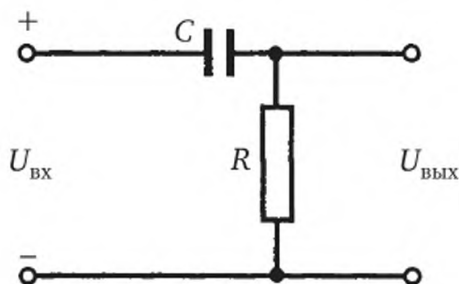


Рис. 13.10. Электрический дифференцирующий контур

Примером использования последовательного корректирующего звена может служить его включение в цепь возбуждения электрического генератора для поддержания постоянного возбуждения независимо от нагрузки и других заранее не известных возмущений. Фактическое отклонение напряжения генератора от заданного является входным напряжением описанного дифференцирующего контура, включенного в рабочую цепь регулируемого генератора, а его выходное напряжение после необходимого усиления подается на вспомогательный электродвигатель, перемещающий ползунок реостата в цепи возбуждения данного генератора. Таким образом, введением последовательного дифференцирующего корректирующего звена оказывается возможным заставить регулируемый объект реагировать не только на отклонение регулируемого параметра, но и на ту скорость, с которой этот параметр начинает изменяться, хотя бы он еще и не достиг отклонения, соответствующего разрешающей способности чувствительного элемента. Это увеличивает способность автоматической системы к реагированию на происходящие в ней отклонения параметров и улучшает ее динамические свойства.

Параллельное включение корректирующих звеньев требует обязательного наличия в цепи автоматической системы цепи обратной связи. Под обратной связью будем понимать всякую подачу сигнала с выхода объекта на его вход, целиком или частично, в неизменном или преобразованном виде. Если объект регулирования можно расчленить на несколько связанных между собой элементов, то в принципе в такой системе наряду со всеохватывающей главной обратной связью могут существовать и местные (иначе называемые дополнительными)

обратные связи, охватывающие только один или несколько элементов. В цепи обратной связи и включаются параллельные корректирующие звенья.

В зависимости от того, с каким знаком подается сигнал, представляющий выходное воздействие обратно на вход элемента, охваченного обратной связью, различают *положительную* и *отрицательную* обратные связи.

В зависимости от вида параллельного корректирующего звена различают *жесткую* и *гибкую* обратные связи. Жесткая обратная связь действует как во время переходных процессов, так и в установившихся режимах. Гибкая обратная связь действует только во время переходных процессов, а во время установившихся режимов действие такой обратной связи прекращается.

Иными словами, применение гибких обратных связей позволяет изменять постоянные времени охваченных ею элементов при неизменном коэффициенте усиления. Положительная гибкая обратная связь используется для форсирования переходных процессов, в частности для придания им лавинообразного характера, а отрицательная — для демпфирования и замедления переходных процессов.

Практически гибкая обратная связь может быть реализована дифференцирующим контуром, подобным уже рассмотренному, но включенному не последовательно с объектом регулирования, а параллельно ему или некоторым его компонентам.

Электрические гибкие обратные связи обычно реализуются с помощью цепей, содержащих емкости или дифференцирующие трансформаторы. Механические гибкие обратные связи, т. е. связи по скорости перемещения рабочего органа, охваченного этой обратной связью, обычно осуществляются с помощью гидравлического амортизатора с подпружиненным штоком. Примером механической гибкой обратной связи может служить гидроамортизатор, используемый в подвеске автомобиля. В таком амортизаторе усилие, которое требуется для перемещения его штока, определяется скоростью этого перемещения: для быстрого перемещения штока необходимо приложить большое усилие, а для медленного — небольшое. Схематически устройство амортизатора показано на рис. 13.11.

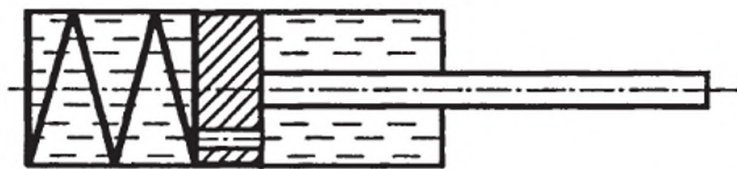


Рис. 13.11. Конструктивная схема гидравлического амортизатора

Такой амортизатор представляет собой герметичский цилиндр, заполненный рабочей жидкостью (маслом). Эта рабочая жидкость может при движении поршня перетекать из полости, расположенной справа от него, в полость, расположенную слева, и наоборот, через

отверстие (или несколько отверстий) в этом поршне. Благодаря пружине поршень находится в среднем, равновесном состоянии. В случае приложения усилия к штоку поршень будет перемещаться, но скорость его перемещения будет ограничиваться скоростью перетекания масла через отверстия в поршне из одной рабочей полости в другую. Скорость же перетекания масла при неизменном гидравлическом сопротивлении отверстия в поршне будет определяться усилием, приложенным к штоку. И наоборот, усилие, приложенное к штоку, будет определяться скоростью перетекания масла из одной полости в другую.

В результате действия отрицательной гибкой обратной связи, охватывающей, например, такое звено, как усилитель, требуемое значение сигнала ошибки на входе этого усилителя устанавливается не тогда, когда ошибка регулируемого параметра достигнет нулевого значения, а когда нулевого значения достигнет отклонение заданной скорости его изменения от фактического значения этой скорости. Этот момент может наступить раньше, поэтому переходный процесс может закончиться раньше, чем при отсутствии такого корректирующего звена.

Контрольные вопросы

1. Что характерно для получения и индикации информации о ходе производственного процесса?
2. Что характерно для получения, переработки и индикации переработанной информации о ходе производственного процесса?
3. Что характерно для получения и переработки информации о ходе производственного процесса с последующим использованием полученных результатов для воздействия на этот процесс?
4. Что называется регулируемым параметром?
5. Что называется возмущающим воздействием?
6. Что называется управляющим воздействием?
7. В чем заключается принцип компенсации возмущений?
8. Каковы достоинства и недостатки принципа компенсации возмущений?
9. В чем заключается принцип компенсации отклонений?
10. Каковы достоинства и недостатки принципа компенсации отклонений?
11. В чем заключается принцип комбинированного управления?
12. Каковы достоинства и недостатки принципа комбинированного управления?
13. В чем заключается принцип адаптации систем управления?
14. На какие категории делятся системы адаптации?
15. Что такое замкнутые автоматические системы?
16. Что такое разомкнутые автоматические системы?
17. Чем различаются автоматизированные и автоматические замкнутые системы?
18. Какие потоки информации существуют в разомкнутых и замкнутых автоматических системах?
19. На какие разновидности делятся системы, использующие внешний источник энергии, в зависимости от физической природы этой энергии?
20. Что такое линейные автоматические системы?
21. Что такое нелинейные автоматические системы?

22. Что такое нелинейные автоматические системы релейного типа?
23. Что такое аналоговые автоматические системы?
24. Каковы основные достоинства и недостатки аналоговых автоматических систем?
25. Что такое дискретные автоматические системы?
26. Каковы основные достоинства и недостатки дискретных автоматических систем?
27. Какие существуют разновидности дискретных автоматических систем?
28. Что такое одноконтурные и многоконтурные автоматические системы?
29. Что такое одномерные и многомерные автоматические системы?
30. Что такое связанные и несвязанные автоматические системы?
31. Что такое системы автоматической стабилизации?
32. Что такое системы программного управления?
33. Что такое следящие системы?
34. Что такое статические системы?
35. Как выглядит типичная статическая характеристика статической системы?
36. Как выглядит типичная динамическая характеристика статической системы?
37. Что такое астатические системы?
38. Как выглядит типичная статическая характеристика астатической системы?
39. Как выглядит типичная динамическая характеристика астатической системы?
40. Какая автоматическая система называется устойчивой?
41. Какая автоматическая система называется неустойчивой?
42. Какие виды переходного процесса характерны для устойчивой системы?
43. Какие виды переходного процесса характерны для неустойчивой системы?
44. Как называется устройство, у которого отсутствует как затухание, так и увеличение амплитуд переходного процесса?
45. Что такое критерий устойчивости автоматической системы?
46. Какие существуют классы критериев устойчивости автоматической системы?
47. В чем состоит основная цель введения отдельных корректирующих звеньев?
48. Что такое последовательное корректирующее звено?
49. Что такое параллельное корректирующее звено?
50. Как устроено и работает электрическое дифференцирующее звено?
51. Как устроено и работает механическое дифференцирующее звено?
52. В чем заключается понятие обратной связи?
53. Что такое гибкая обратная связь?
54. Что такое жесткая обратная связь?
55. Как работает положительная обратная связь?
56. Как работает отрицательная обратная связь?
57. Какое влияние на переходные процессы оказывает положительная обратная связь?
58. Какое влияние на переходные процессы оказывает отрицательная обратная связь?

Глава 14

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОПИРОВАНИЯ

§ 14.1. Станки-автоматы с непосредственным моделированием перемещений рабочих органов

Детали пространственной формы, которые не поддаются обработке или недостаточно эффективно обрабатываются на обычных станках, обрабатывают на станках, называемых *копировальными*.

Системы управления копировальными станками представляют собой особый вид следящих систем, замкнутых или разомкнутых, в которых изменение входной величины происходит по определенному закону, который может быть любым и задается в виде материальной модели-аналога.

Копировальные системы широко применяются в металлообрабатывающих станках для изготовления судовых гребных винтов, лопаток газовых, паровых и гидравлических турбин, воздушных винтов самолетов, пресс-форм, литейных форм и кокилей, кулачков и т. п.

Профиль обрабатываемой детали обычно формируется путем сочетания двух (иногда трех) движений детали и инструмента. Результирующее перемещение инструмента относительно детали образуется геометрическим сложением векторов двух взаимно перпендикулярных перемещений. Одно из этих движений, а именно непрерывное движение копира (шаблона обрабатываемой детали) с постоянной скоростью вдоль одной из координатных осей, называется *задающей подачей* $S_{\text{зад}}$, а другое, представляющее собой вынужденное движение копировального щупа (называемого также копировальным пальцем) вдоль оси, перпендикулярной первой оси, называется *следящей подачей* $S_{\text{сл}}$. Следящая подача в зависимости от изменения наклона, определяемого профилем шаблона, может изменяться как по величине, так и по знаку. Образование *результирующей подачи* S_p показано на рис. 14.1.

Все копировальные станки можно разделить на два класса. К первому относятся станки с жесткой кинематической связью между копировальным щупом и исполнительным органом, например поперечным суппортом. Ко второму классу относятся станки со следящей системой, использующей промежуточные усилители мощности между копировальным щупом и исполнительным органом.

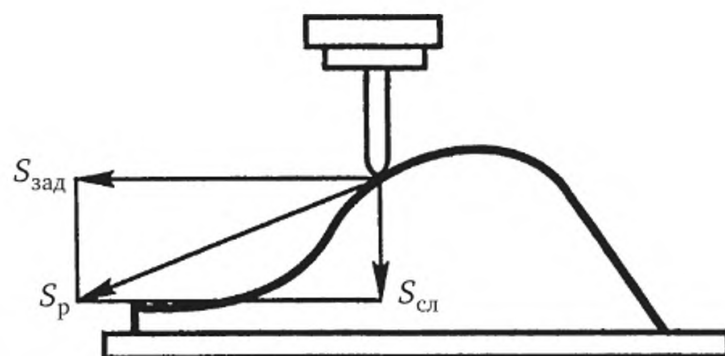


Рис. 14.1. Схема образования результирующей подачи

Копировальные станки — это, как правило, полуавтоматы, где автоматизированы только операции собственно обработки, поскольку сложность воспроизводимого профиля детали и длительность ее обработки делают операции загрузки-выгрузки относительно менее значащими. Однако в последнее время в производстве все в более широкой степени применяются различного рода автооператоры и роботы-загрузчики, обеспечивающие работу копировальных станков в режиме полного автомата.

Копировальные станки с жесткой кинематической связью между копировальным щупом и исполнительным органом, отличаясь простотой конструкции и принципиальным отсутствием автоколебаний, находят тем не менее лишь ограниченное применение.

Примером подобных станков могут служить вертикальные токарные многошпиндельные многопозиционные полуавтоматы. В таких копировальных полуавтоматах на каждой позиции обработки движение суппортов происходит под воздействием равномерно вращающихся цилиндрических барабанов-копиров с цилиндрическими винтовыми пазы, выполненными на их поверхности. В эти пазы заводятся ролики-толкатели, которые жестко связаны с суппортами, перемещающимися по своим направляющим и содержащими металлорежущие инструменты, осуществляющие обработку на данной позиции. В таких копировальных станках усилие резания развивается за счет усилия, с которым копир (шаблон) воздействует на копировальный ролик, установленный на щупе.

Другим примером подобных систем является производство автомобильных поршней. Детали типа поршней имеют в поперечном сечении форму эллипса, а в продольном сечении — бочкообразную форму.

В этом случае эллипс в поперечном сечении может быть образован сечением цилиндра плоскостью, неперпендикулярной его оси вращения. Бочкообразность же продольного сечения обеспечивается за счет применения плоских копиров (шаблонов), представляющих собой воспроизведение в требуемом масштабе осевого сечения получаемой детали.

Такому методу можно придать и большую универсальность, обеспечивая перемещение резца как в осевом, так и в радиальном направле-

нии либо с помощью копиров объемной формы, либо путем сочетания двух или трех плоских копиров.

Однако, несмотря на свою простоту, метод прямого копирования и перемещения режущего инструмента под непосредственным воздействием копира обладает следующими принципиальными недостатками:

- точность изготовления копира непосредственно влияет на точность обработки детали;
- усилие резания создается воздействием копира на копируемый щуп (ролик), что требует изготовления как копира, так и щупа, контактирующего с копиром, из износостойкого материала, большей частью из закаленных инструментальных сталей;
- сложно точно изготовить копир из труднообрабатываемого материала;
- необходимо часто заменять копир вследствие больших усилий в точке контакта копира с копируемым щупом и относительно быстрого износа этого копира и потери точности;
- требуется специальная конструкция точной и жесткой кинематической цепи между копиром и копируемым щупом;
- в процессе эксплуатации необходимо подстраивать передаточное отношение цепи между копиром и копируемым щупом вследствие дрейфа точности копирования;
- трудно поддерживать постоянство результирующей подачи, представляющей собой гипотенузу прямоугольного треугольника, катетами которого являются задающая и следящая подачи, что необходимо из технологических соображений, так как именно результирующая подача создает вектор контурной скорости, касательный к воспроизводимому профилю.

Необходимость многократного точного изготовления копира из труднообрабатываемого материала является ключевым недостатком, затрудняющим эксплуатацию станков, использующих метод прямого копирования. Поэтому такой метод копирования применяется в основном в редко переналаживаемом, но высокоавтоматизированном производстве, например в шарико- и роликоподшипниковой и автомобильной промышленности, а также в производстве электродвигателей.

Большое распространение получили одношпиндельные токарные автоматы, работающие с прутковыми заготовками и использующие распределительный вал с кулачками. Для таких автоматов характерно наличие двух ветвей передачи движения: ветви главного движения — от приводного электродвигателя к рабочему шпинделю, и ветви подач — от электродвигателя к распределительному валу. Самой простой является кинематическая схема такого копируемого станка, у которого подачи рабочих суппортов обеспечиваются профилями сменных кулачков, устанавливаемых на распределительном валу, причем этот распределительный вал вращается равномерно. Так, в частности, устроены и работают широко распространенные автоматы для

фасонного продольного точения, а также почти все токарно-револьверные автоматы.

Многошпиндельные токарные автоматы, в том числе и принципиально рассмотренные выше, характеризуются по большей части специальной конструкцией распределительных валов, которые состоят из нескольких участков, кинематически связанных друг с другом, но с различными методами ориентации и крепления цилиндрических, дисковых и командных кулачков.

§ 14.2. Станки-автоматы с усилителями мощности

В большинстве случаев для обеспечения воспроизведения на профиле обрабатываемой детали профиля копира применяются замкнутые следящие системы с обратной связью, использующие усилители мощности. Это обусловлено необходимостью разгрузить копир от усилий резания и использовать дополнительные внешние источники энергии, а также необходимостью осуществлять промежуточную обработку и преобразование потока информации между копирувальным щупом и обрабатываемым на детали профилем.

По своей физической природе следящие системы копируальных станков бывают весьма разнообразными: электрическими, гидравлическими, пневматическими и комбинированными (электрогидравлическими, электропневматическими, гидропневматическими, электрогидропневматическими).

Сущность следящей системы электрического копируально-фрезерного станка представлена на схеме, приведенной на рис. 14.2.

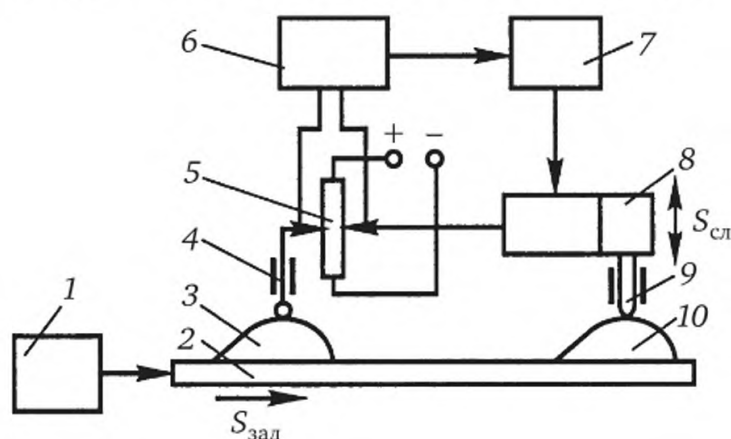


Рис. 14.2. Схема следящей системы электрокопируального станка

Принцип работы подобных станков состоит в следующем. Обработка детали 10 производится по копиру 3, который вместе с деталью устанавливается на рабочем столе 2. Рабочий стол перемещается под воздействием привода 1 в направлении задающей подачи $S_{\text{зад}}$. Фреза 9 (привод которой здесь не показан, чтобы не загромождать схему) получает следящую подачу $S_{\text{сл}}$, будучи связанной с исполнительным рабочим орга-

ном 8. Рассогласование фактической траектории фрезы 9 относительно детали 10 и той траектории, которая задается профилем копира 3, определяется копировальным устройством, состоящим из потенциометрического датчика 5, усилителя 6 сигнала рассогласования положений движков этого потенциометра (левый из них связан с копировальным щупом 4, а правый — с фрезой 9) и исполнительного привода 7.

На усилитель 6 сигнал будет поступать только в том случае, если движки потенциометра 5 не находятся друг против друга, причем знак этого сигнала определяется тем, какой из двух движков, левый или правый, находится выше, а какой — ниже. Соответственно направление вращения электродвигателя исполнительного привода 7, определяемого знаком напряжения сигнала, поступающего на усилитель 6, будет таким, чтобы положение фрезы 9 относительно детали 10 совпадало с положением щупа 4 относительно копира 3. Только в случае полного совпадения положения фрезы 9 относительно детали 10 с положением щупа 4 относительно копира 3 электродвигатель исполнительного привода 7 будет находиться в покое. Подобная система, являющаяся астатической, уже рассматривалась выше. В итоге оказывается, что фреза 9 следует за движением щупа 4.

В копировальных станках и вообще в автоматическом технологическом оборудовании весьма широко применяются гидравлические следящие системы. Принцип действия таких систем состоит в том, что сравнивается фактическое положение рабочего органа, перемещаемого тем или иным видом гидравлического исполнительного привода, с заданной величиной перемещения, определяемой тем или иным задающим устройством.

Примером может служить принципиальная схема гидравлического копировального токарного полуавтомата, которая приведена на рис. 14.3.

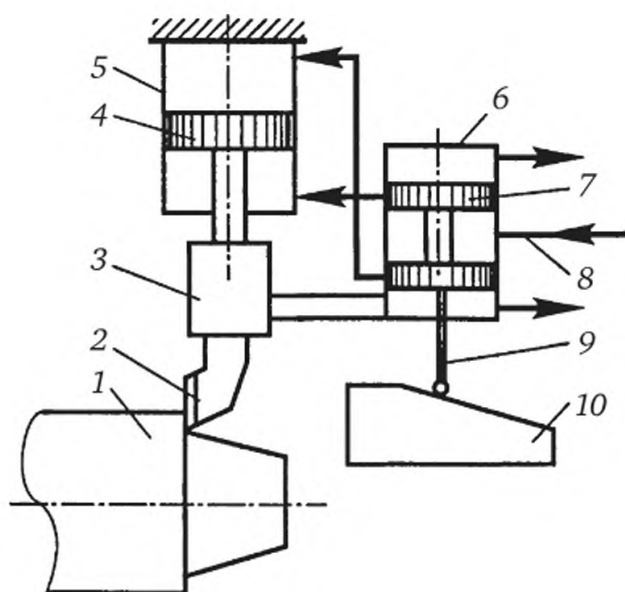


Рис. 14.3. Схема гидравлической следящей системы копировального станка

Эта схема устроена и работает следующим образом. Копировальный палец (щуп) 9 касается профиля шаблона 10, представляющего собой требуемое осевое сечение обрабатываемой детали 1. Копировальный палец 9 связан с гидрозолотником 7, перемещающимся внутри своего корпуса 6. К центру корпуса гидрозолотника подводится через соответствующий трубопровод 8 рабочая жидкость (масло) от гидронасоса. Обработка детали 1 производится резцом 2, закрепленным в державке 3, жестко связанной с корпусом 6 гидрозолотника 7. Поперечное перемещение державки 3, установленной на поперечном суппорте, осуществляется штоком поршня 4, перемещающегося внутри гидроцилиндра 5. Гидроцилиндр 5 жестко закреплен на неподвижной станине станка.

При продольной подаче копировальный палец 9, взаимодействуя с профилем копира 10, перемещается вверх или вниз и перемещает гидрозолотник 7. При этом кромки гидрозолотника открывают подачу поступающего масла соответственно в нижнюю или верхнюю полости рабочего гидроцилиндра 5 и слив масла соответственно из верхней или нижней полостей гидроцилиндра. Под давлением поступающего масла поршень 4 двигается, перемещая с требуемым усилием державку 3 с закрепленным в ней резцом 2, благодаря чему обрабатывается с нужным углом профиля деталь 1. Движение державки 3 вызывает соответствующее перемещение корпуса 6 гидрозолотника 7. Только тогда, когда перемещение державки 3 с резцом 2 уравнивается с перемещением копировального пальца 9, гидрозолотник 7 и его корпус 6 займут друг относительно друга исходное положение, и подача масла в полости рабочего цилиндра 5 будет перекрыта. Это значит, что положение резца 2 соответствует положению копировального пальца 9, а профиль детали 1 соответствует профилю копира 10. Эта система также является астатической и может быть в равновесии лишь тогда, когда гидрозолотник 7 перекрывает подачу масла как в нижнюю, так и в верхнюю полости рабочего гидроцилиндра 5, т. е. когда профиль обрабатываемой детали 1 совпадает с профилем задающего копира 10.

Автоматические системы часто строятся с использованием электрических, гидравлических и механических компонентов. Показательной в этом отношении является система автоматизации электроэрозионного станка, работающего по принципу воспроизведения на детали пространственной формы электрода-инструмента. Съем материала с заготовки осуществляется электрическими разрядами между заготовкой и объемным электродом-инструментом. Разряды создаются отдельным генератором импульсов. Задача системы управления при этом заключается в том, чтобы следить за рабочим зазором между электродом-инструментом и заготовкой и обеспечивать необходимую подачу электрода-инструмента на заготовку. Если зазор оказывается недопустимо большим, то электрические разряды между электродом-инструментом и заготовкой прекращаются и прекращается съем металла с заготовки. Если зазор оказывается слишком маленьким, то электрические разряды между электродом-инструментом и заготовкой опять-таки прекраща-

ются, так как при этом возникает режим, близкий к короткому замыканию, и съем металла с заготовки также прекращается.

Электрогидрокинематическая следящая система включает в себя гидравлическую насосную установку, гидрозолотник пуска и останова, рабочий гидроцилиндр, в котором перемещается в шариковых опорах шток-шпиндель с электрододержателем, а также устройства, образующие схему электрической автоматики.

Управление перемещением штока-шпинделя с электрододержателем осуществляется с помощью электроуправляемого регулятора, направляющего рабочую жидкость (масло) в ту или другую полость рабочего гидроцилиндра, соединяя при этом противоположные полости указанного гидроцилиндра со сливом, как уже описывалось выше.

Слежение за величиной электроэрозионного зазора осуществляется с помощью потенциометра, включенного параллельно измеряемому электроэрозионному промежутку. Положение движка этого потенциометра определяет задание величины промежутка.

Электрические следящие системы часто реализуются на потенциометрах или (в случае использования трехфазного переменного тока) на сельсинах, образуя так называемый электрический вал, осуществляющий дистанционную передачу вращения. Здесь измерителем угла поворота задающего вала является сельсин-датчик. Трехфазная обмотка его статора включена встречно трехфазной обмотке статора сельсина-приемника. При этом напряжение однофазной обмотки ротора сельсина-приемника оказывается пропорциональным разнице углов поворота роторов сельсина-датчика и сельсина-приемника. Это напряжение усиливается соответствующим усилителем переменного тока и с выхода усилителя подается на реверсивный серводвигатель, который через редуктор поворачивает ротор сельсина-приемника. С валом этого серводвигателя кинематически связан и выходной вал всей дистанционной передачи. Лишь в случае равенства ЭДС во включенных встречно обмотках статоров сельсина-датчика и сельсина-приемника будет отсутствовать ЭДС в однофазной обмотке ротора сельсина-приемника. Это будет иметь место только тогда, когда положение роторов и сельсина-датчика, и сельсина-приемника относительно их статоров будет одинаковым, и, следовательно, только в этом случае реверсивный серводвигатель на выходе всей системы «электрического вала» не будет вращаться.

Известны и подобным же образом строятся системы гидравлического вала.

§ 14.3. Автоколебания в системах с усилителями мощности

Если в автоматической системе действуют силы, вызывающие рассеивание энергии, например силы сухого трения, и силы, описываемые потенциальной функцией, например силы инерции, то при пополнении за счет внешних источников энергии, потраченной в виде безвозврат-

ных потерь, в системе могут возникнуть колебания, в том числе и незатухающие. Таким образом, реальные автоматические системы с внешними усилителями мощности способны совершать автоколебания, т. е. колебания, определяемые исключительно свойствами самой системы, а не параметрами приложенного к ней воздействия.

Эти колебания не зависят также от начальных условий и устанавливаются таким образом, чтобы приращение энергии за один период колебаний равнялось нулю. Асимптотически устойчивые периодические изменения параметров автоматической системы принято называть ее *автоколебаниями*, а саму систему, в которой происходят подобные изменения параметров, называют *автоколебательной*.

Хорошо изученными автоколебательными системами являются, например, обычные часы или различного рода генераторы гармонических колебаний.

Рассмотрим характерные свойства автоколебательных систем с подпиткой от внешнего источника энергии на примере генератора электрических колебаний на базе транзистора. Схема такого генератора приведена на рис. 14.4.

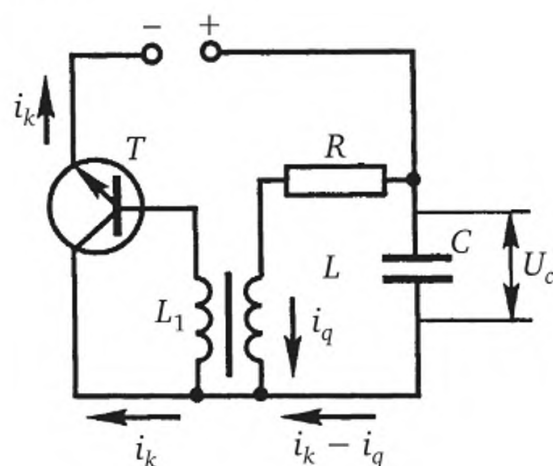


Рис. 14.4. Схема транзисторного генератора

Генератор, подобный представленному на рис. 14.4, предназначен для создания незатухающих гармонических колебаний в электрическом контуре, т. е. для получения переменного тока при питании постоянным напряжением. Такие устройства находят широкое применение в радиотехнике, а также в автоматике, особенно для задания типовых гармонических воздействий при исследовании динамических свойств различных электрических цепей.

Источником внешней энергии здесь является источник постоянного напряжения, питающий транзистор Т. В коллекторную цепь этого транзистора включен электрический колебательный RLC -контур. В цепь базы транзистора включена обмотка, являющаяся по отношению к индуктивности колебательного контура вторичной обмоткой трансформатора. Благодаря индуктивной связи между индуктивностью колебательного контура в коллекторной цепи транзистора и обмот-

кой в цепи его базы обеспечивается такое пополнение энергии RLC -контура, при котором в этом контуре компенсируются потери энергии на омические сопротивления и устанавливаются незатухающие электрические колебания.

Для составления дифференциального уравнения, определяющего колебания силы тока i_q в ветви RL колебательного контура, включенного в коллекторную цепь транзистора Т, определим сначала напряжение U_c на конденсаторе C :

$$U_c = 1/C \int_0^t [i_k(\tau) - i_q(\tau)] d\tau.$$

По второму закону Кирхгофа эта величина равна сумме падений напряжения на катушке самоиндукции L и на омическом сопротивлении R , следовательно, имеет место соотношение

$$Li_k(\tau) - Ri_q(\tau) = 1/C \int_0^t [i_k(\tau) - i_q(\tau)] d\tau.$$

Если продифференцировать по t правую и левую части этого равенства, получим

$$i_q(t)'' + 2\epsilon i_q(t)' + k^2 i_q(t) = k^2 i_k(t),$$

где $i_q(t)' = di_q(t)/dt$; $\epsilon = 1/2(R/L)$; $k^2 = 1/LC$.

У транзистора Т коллекторный ток i_k является функцией от напряжения на его базе U_6 . В теории колебательных систем показывается, что без качественного изменения картины автоколебаний в рассматриваемой схеме эту зависимость можно аппроксимировать ступенчатой функцией, как показано на рис. 14.5.

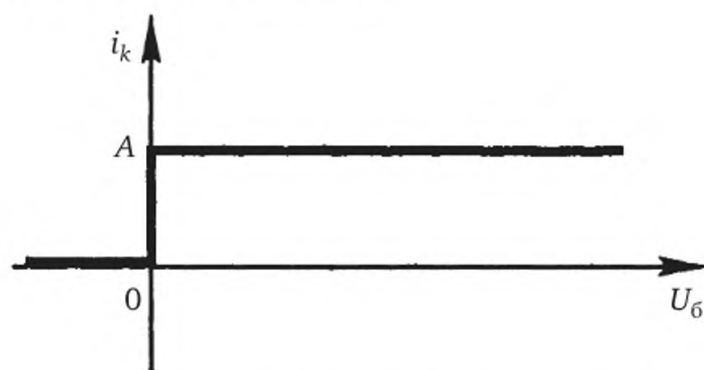


Рис. 14.5. Аппроксимация зависимости коллекторного тока транзистора от напряжения на его базе

Ступенчатая характеристика, изображенная на рис. 14.5, в аналитическом виде запишется следующим образом:

$$i_k = \begin{cases} A & \text{при } U_6 \geq 0, \\ 0 & \text{при } U_6 < 0. \end{cases}$$

Так как напряжение на базе транзистора Т в силу трансформаторной связи катушек L и L_1 пропорционально производной от тока i_q по времени, это соотношение можно переписать в следующем виде:

$$i_k = \begin{cases} A & \text{при } i_q \geq 0, \\ 0 & \text{при } i_q < 0. \end{cases}$$

Тогда исходное дифференциальное уравнение приобретает вид

$$i_q(t)'' + 2\varepsilon i_q(t)' + k^2 i_q(t) = \begin{cases} k^2 A & \text{при } i_q \geq 0, \\ 0 & \text{при } i_q < 0. \end{cases}$$

Интегрирование этого уравнения производится по тем интервалам времени, в которых функция $i_q(t)$ сохраняет свой знак.

В результате интегрирования в отдельных интервалах времени и построения полученных изображающих точек в координатах $i_q(t)'$ — $i_q(t)$ получаем траектории их движения в этих координатах. Плоскость, координатными осями которой являются отклонения того или иного параметра и скорость изменения отклонения этого параметра, называется *фазовой плоскостью*. Совокупность комбинаций этих отклонений и скоростей изменения этих отклонений должна трактоваться как координата соответствующей *изображающей точки*. Совокупность таких изображающих точек будет представлять *изображающую траекторию* данного изменения параметра. Заметим, что изображающая траектория изменения параметра на фазовой плоскости и, фактическая траектория движения точки (если речь идет о механических колебаниях) — это совершенно разные понятия.

В случае установившихся колебаний изображающая траектория будет представлять собой замкнутую кривую, как показано на рис. 14.6. Следует отметить, что параметры этой замкнутой кривой не зависят от начальных условий, соответствующих отклонению параметра, а целиком определяются свойствами самой системы.

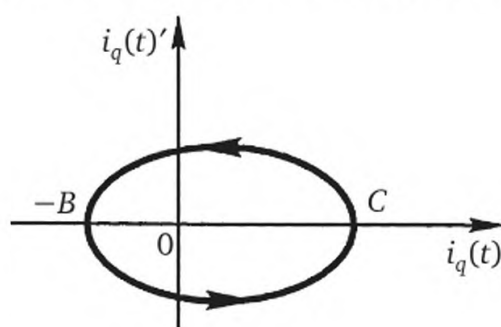


Рис. 14.6. Изображающая траектория на фазовой плоскости для установившихся колебаний

Величины B и C определяются из следующих соотношений:

$$B = \beta A / (1 - \beta); \quad C = A / (1 - \beta),$$

где $\beta = \exp[-\varepsilon(\pi/\omega)]$, причем $\omega = (k^2 - \varepsilon^2)^{1/2}$.

Траектории изображающей точки асимптотически приближаются к замкнутой фазовой траектории, показанной на рис. 14.6 и определяемой приведенными значениями для B и C . Определенная таким образом фазовая траектория является устойчивым *предельным циклом* и соответствует автоколебаниям, возникающим в транзисторном генераторе колебаний, изображенном на рис. 14.4 и использующем внешний источник энергии.

§ 14.4. Методы исследования и устранения автоколебаний в системах с усилителями мощности

Итак, поведение нелинейной автоматической системы может быть изображено в виде траектории на фазовой плоскости. Вопрос состоит в том, чтобы, не решая в квадратурах нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие исследуемую динамическую систему, вырабатывать качественные суждения о ее поведении и о мерах, которые могут быть приняты для устранения нежелательных колебаний, потенциально возникающих в этой системе.

Качественные методы особенно эффективны при изучении движения нелинейных систем с одной степенью свободы, но в ряде случаев эти методы могут быть успешно применены, и для изучения нелинейных систем с несколькими степенями свободы.

Те системы, в которых действуют только *потенциальные* силы (т. е. силы, образующие некоторый потенциал энергии системы), а другие силы к системе не приложены, называются *консервативными*.

Те же системы, в которых кроме потенциальных действуют еще и диссипативные силы, т. е. такие силы, которые приводят к рассеиванию (*диссипации*) энергии, называются *диссипативными*.

В механических диссипативных системах подобные дополнительные силы представляют собой сумму сил вязкого и сухого трения.

Доказано, что в диссипативных системах с одной степенью свободы система дифференциальных уравнений, описывающих изменения параметров системы, может быть сведена к одному нелинейному дифференциальному уравнению. На основании решения этого уравнения в функции от отклонения параметра и от скорости изменения этого отклонения на фазовой плоскости можно построить фазовую траекторию системы. Типичный вид такой фазовой траектории для затухающих автоколебаний показан на рис. 14.7.

На рис. 14.7 величины a_0 , a_1 , a_2 и a_3 представляют собой абсолютные значения абсцисс последовательных точек пересечения фазовой траектории системы с осью $P(t)' = 0$. Эти величины принято называть последовательными амплитудами колебаний системы.

Если руководствоваться обозначениями, принятыми на рис. 14.7, такая последовательность амплитуд в общем случае определится следующими рекуррентными соотношениями:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \beta a_0 - B(1 + \beta); \\
 a_2 &= \beta a_1 - B(1 + \beta); \\
 a_3 &= \beta a_3 - B(1 + \beta); \\
 &\dots \\
 a_{n-1} &= \beta a_{n-2} - B(1 + \beta); \\
 a_n &= \beta a_{n-1} - B(1 + \beta).
 \end{aligned}$$

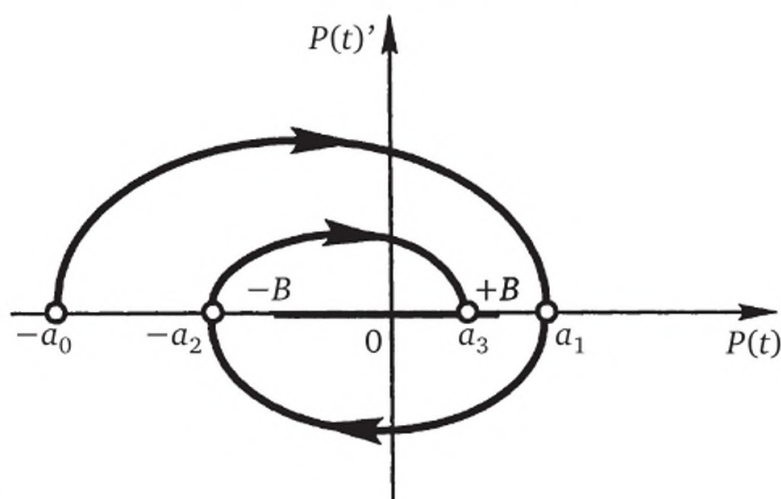


Рис. 14.7. Фазовая траектория затухающих колебаний в нелинейной системе с одной степенью свободы

Здесь по-прежнему $\beta = \exp[-\varepsilon(\pi/\omega)]$, причем $\omega = \sqrt{k^2 - \varepsilon^2}$, а 2ε — коэффициент при том члене нелинейного уравнения, который пропорционален первой производной обобщенной координаты по времени, представляющей собой скорость изменения этой координаты. Иными словами, коэффициент ε характеризует действующие в системе силы вязкого трения. Коэффициент B характеризует действующие в системе силы сухого трения, т. е. определяет знак отклонения (направление отклонения) обобщенной координаты, а отнюдь не величину этого отклонения или скорость его изменения.

Отрезок $[-B, +B]$ оси абсцисс фазовой плоскости называется *зоной застоя* (или *отрезком покоя*) исследуемой системы.

Если изображающая точка системы в каком-то полупериоде колебаний попадает в зону застоя, то движение системы прекращается. Действительно, в любой точке этого отрезка (отрезка покоя) восстанавливающая сила, вызывающая дальнейшие колебания, уравнивается силой сухого трения. Так как на оси абсцисс сила вязкого трения, пропорциональная скорости изменения отклонения обобщенной координаты, обращается в нуль, то в нуль обращается и скорость изменения этой обобщенной координаты. Следовательно, при попадании изображающей точки в зону застоя всякое движение системы прекращается. А изображающая точка неминуемо за конечное время попадет в зону застоя, так как за каждое полуколебание, какова бы ни была начальная амплитуда a_0 , амплитуда колебаний убывает на величину, не меньшую,

чем $2B$ (это показывается в специальной литературе по теории нелинейных систем).

Если $\varepsilon = 0$, т. е. в диссипативные силы, действующие в системе, входят лишь силы сухого трения, то $\beta = 1$ и $a_n = a_0 - 2Bn$.

Если же в системе отсутствуют силы сухого трения, т. е. $B = 0$, то имеет место следующее равенство:

$$a_n = \beta^n a_0.$$

Это значит, что при отсутствии сил сухого трения зона застоя у системы отсутствует и собственные колебания системы затухают лишь асимптотически при $t \rightarrow \infty$.

Для систем с одной степенью свободы доказано также, что наличие или отсутствие сил сухого трения не влияет на величину периода собственных колебаний системы. Половина же периода собственных колебаний системы будет равна π/ω .

Контрольные вопросы

1. Какие станки называют копировальными?
2. Каковы области применения копировальных станков?
3. Что такое задающая подача?
4. Что такое следящая подача?
5. Что такое результирующая подача?
6. На какие два класса разделяются копировальные станки?
7. Почему копировальные станки традиционно конструировались в виде полуавтоматов?
8. Каковы достоинства и недостатки копировальных станков, использующих метод прямого копирования?
9. Каковы достоинства и недостатки копировальных станков, использующих усилители мощности на базе следящих систем?
10. Каковы характерные особенности одношпиндельных станков с прямым копированием?
11. Каковы характерные особенности многошпиндельных станков с прямым копированием?
12. Какими бывают следящие системы копировальных станков по их физической природе?
13. В чем состоит сущность работы электрокопировальной системы фрезерного станка?
14. Как происходит сравнение положения копировального щупа и рабочего органа в электрической системе копирования?
15. В чем состоит сущность работы гидрокопировальной системы токарного полуавтомата?
16. Как происходит сравнение положения копировального щупа и рабочего органа в гидравлической системе копирования?
17. Что стабилизируется в системе управления копировальным станком для электроэрозионной обработки?
18. Как строится «электрический вал» на постоянном токе?
19. Как строится «электрический вал» на переменном токе?
20. Что такое автоколебания?

21. Какую систему называют автоколебательной?
22. Для чего могут быть использованы автоколебательные системы?
23. Как аппроксимируется характеристика транзистора при расчете автоколебаний?
24. Что такое фазовая плоскость?
25. Что такое изображающая точка?
26. Что такое изображающая траектория?
27. Какой вид характерен для изображающей траектории при установившемся режиме автоколебаний?
28. В каких случаях изображающая траектория является предельным циклом?
29. Что характерно для качественных методов исследования нелинейных систем?
30. Когда наиболее эффективно применение качественных методов исследования нелинейных систем?
31. Как выглядит фазовая траектория затухающих колебаний в нелинейной системе с одной степенью свободы?
32. Что такое последовательные амплитуды колебаний системы?
33. Как определяются последовательные амплитуды колебаний системы?
34. Какие системы называются консервативными?
35. Какие силы, действующие в системах, называются диссипативными?
36. Что характерно для сил вязкого трения?
37. Что характерно для сил сухого трения?
38. Что называется зоной застоя нелинейной системы?
39. Что является условием наличия у системы зоны застоя?
40. Зависит ли полупериод автоколебаний от наличия или отсутствия среди сил, действующих на систему, сил сухого трения?

Глава 15

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ В МЕХАНООБРАБОТКЕ

§ 15.1. Механообрабатывающее оборудование циклического действия

Всякая информация о ходе производственного процесса в конечном счете используется для управления станками и другим технологическим оборудованием, а также комплексами. Под этим подразумевается выдача на механизмы совокупности воздействий, обеспечивающих выполнение технологического процесса обработки, а устройство или совокупность устройств, обеспечивающих своевременную выдачу таких воздействий, рассматривается как система управления.

В ряде случаев решения на основании имеющейся информации принимает человек (оператор), который включает и выключает соответствующие механизмы или/и задает им режим работы. Такое управление независимо от степени автоматизации и механизации исполнения принятых решений называют *ручным*.

Если же решения о формировании и исполнении элементов рабочего цикла принимает система управления без участия оператора, и она же выдает команды на включение и выключение механизмов и управляет их работой, то такое управление называют *автоматическим*.

Среди функциональных систем автоматического управления следует особо выделить автоматическое управление рабочими циклами. Циклом (от лат. *ciclus*, означающего «оборот») называется такая совокупность изменений рабочего параметра (перемещения исполнительных органов, давления, температуры и др.) или комбинаций нескольких рабочих параметров, которая заканчивается при том же значении этих параметров, при котором она началась. Наряду с копировальными автоматами и полуавтоматами, а также оборудованием с числовым программным управлением автоматические установки, работающие по циклу, являются важным типом технологических устройств.

Различают три типа автоматических устройств, использующих те или иные циклы.

1. Автоматическое оборудование, работающее по неизменяемому циклу обработки, когда сразу же после окончания очередного рабо-

чего цикла и возвращения всех рабочих органов в исходное положение (состояние) начинается следующий рабочий цикл. Примером является управление агрегатными станками, выполняющими фрезерные, сверлильные, расточные и резьбонарезные операции путем осуществления циклов движений многошпиндельных силовых головок.

2. Автоматическое оборудование, работающее по неизменяемым рабочим циклам, в котором момент начала очередного цикла определяется специальной командой. Примером может служить выполнение в нужный момент циклов смены режущего инструмента в многоинструментных станках типа «обрабатывающий центр».

3. Автоматическое оборудование, в котором и момент начала очередного цикла определяется специальной командой, и сам рабочий цикл может изменяться. Примером могут служить рабочие циклы, которые задаются для каждой детали в виде индивидуальных материальных моделей-аналогов (копиров, наборов кулачков, системы упоров и т. д.).

Системы управления технологическими циклами обработки традиционно строятся на базе логических переключательных схем либо на базе электромеханических кулачковых командоаппаратов, нажимающих (при вращении вала с кулачками) в нужной последовательности на устройства типа путевых переключателей, воздействующих на электрические исполнительные цепи. Задающий кулачковый вал такого командоаппарата может вращаться либо с постоянной скоростью (синхронно с движением главного привода), либо он может поворачиваться в старт-стопном режиме, когда его вращение включается лишь по сигналу о выполнении команд, включенных во время его предыдущего движения.

Важной разновидностью автоматического оборудования, реализующего автоматические рабочие циклы, являются традиционные непереключаемые *автоматические линии* (с гибкой или жесткой межстаночной связью), а также *агрегатные станки*.

Агрегатными называются станки, которые komponуются из самостоятельных функциональных унифицированных и частично специализированных узлов и деталей путем объединения их в единый агрегат с общей системой управления. Агрегатные станки применяются главным образом в массовом и крупносерийном производствах. Однако агрегатные станки с узлами, использующими числовое программное управление (ЧПУ), могут с успехом применяться и в мелкосерийном производстве.

Типовые узлы агрегатных станков сведены в классификационную схему, приведенную на рис. 15.1.

Агрегатные станки, komponуемые на основе указанных унифицированных узлов, отличаются между собой по типоразмерам, компоновкам и по входящим в них силовым, шпиндельным, базовым и транспортным устройствам.

По типоразмерам агрегатные станки делятся на *малые* — с небольшими силовыми головками с выдвижной пинолью мощностью в преде-

лах 0,18...0,75 кВт, *средние* — с силовыми головками с выдвижными пинолями и кулачковым приводом мощностью в пределах 1,1...3,0 кВт и *крупные* — со специальными гидравлическими или электромеханическими столами, на которых устанавливают различные шпиндельные узлы.

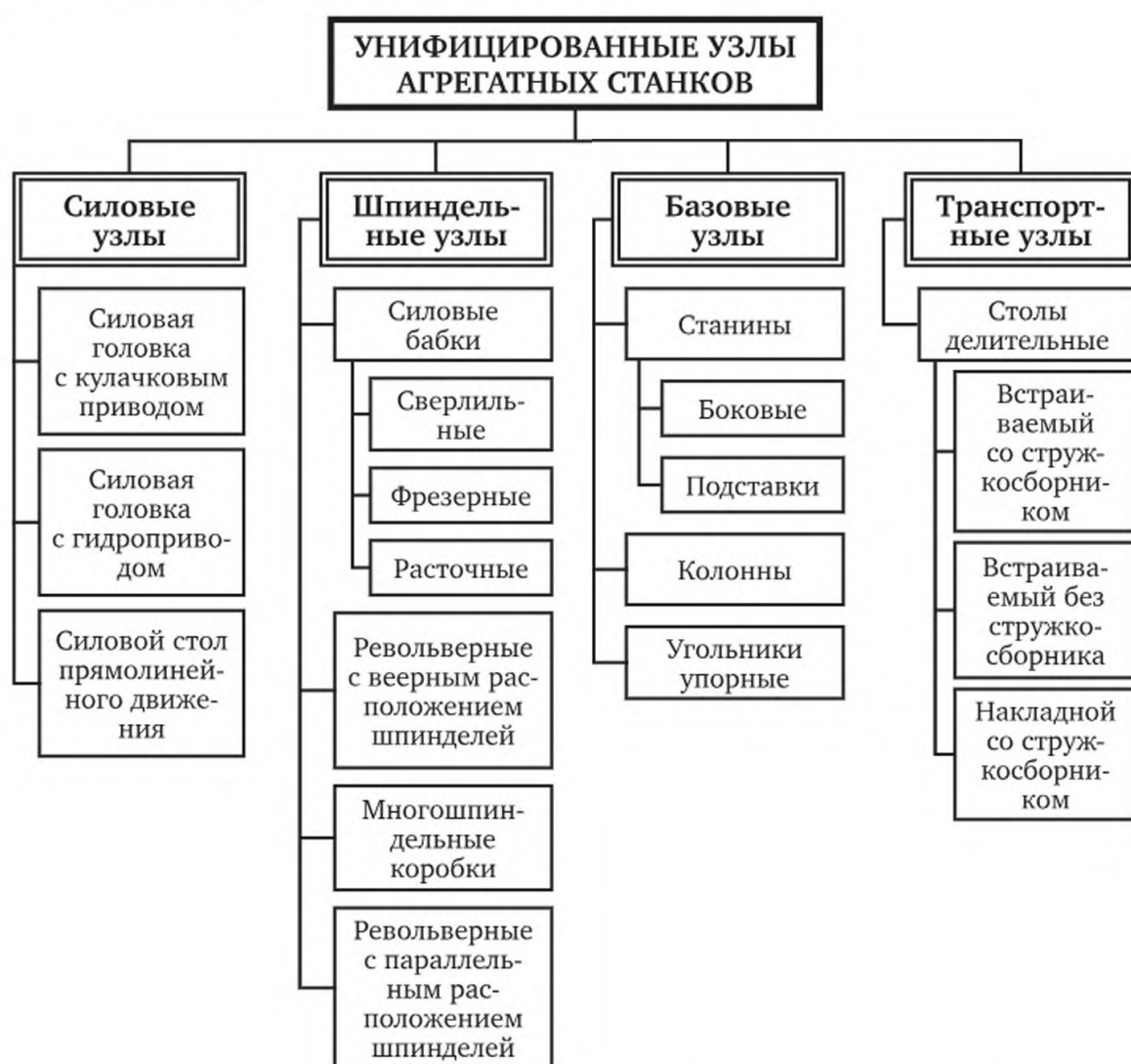


Рис. 15.1. Классификация типовых узлов агрегатных станков

Принято также различать одно- и многопозиционные агрегатные станки.

В *однопозиционных* агрегатных станках заготовка обрабатывается в одном положении с одной, двух или трех сторон. Такие станки обычно применяют для многосторонней обработки крупных заготовок, остающихся во время всего цикла обработки на одной и той же рабочей позиции.

В *многопозиционных* агрегатных станках заготовка обрабатывается за несколько переходов, проходя при этом несколько рабочих позиций последовательно, параллельно или последовательно-параллельно.

Типовыми компоновками агрегатных станков являются *вертикальная* или *горизонтальная*.

Типичные циклы движений для силовых головок приведены на рис. 15.2.

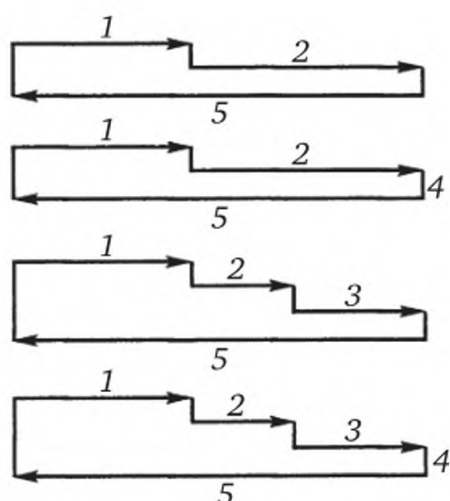


Рис. 15.2. Схемы вариантов циклов силовых головок

Цифрой 1 обозначен быстрый подвод силовых головок, цифрой 2 — рабочая подача одной величины, цифрой 3 — рабочая подача другой величины, цифрой 4 — выстой на жестком упоре, а цифрой 5 — быстрый отвод силовых головок.

На рис. 15.3 приведен один из возможных вариантов цикла движений головки для глубокого сверления (с промежуточным отводом в исходное положение). Здесь цифрой 1 по-прежнему обозначен быстрый подвод силовой головки из общего исходного положения в промежуточное исходное положение, после чего начинается ее рабочая подача, обозначенная, как и на рис. 15.2, цифрой 2. По достижении некоторого первого промежуточного рабочего положения осуществляется быстрый отвод силовой головки в промежуточное исходное положение, что обозначено цифрой 4. Затем силовая головка быстро на подаче 1 подводится к первому промежуточному рабочему положению (строго говоря, несколько не доходя до него), а затем на той же рабочей подаче 2 осуществляется ее перемещение до второго промежуточного рабочего положения, где она переключается на новое значение рабочей подачи, обозначенное цифрой 3. По достижении конца обработки силовая головка быстро (с величиной подачи, обозначенной цифрой 4) окончательно отводится в общее исходное положение.

Возможны и другие варианты циклов, реализуемых исполнительными органами агрегатных станков.

Из агрегатных станков могут строиться и автоматические линии. В этом случае автоматическая линия рассматривается как одно целое и строится из единой гаммы унифицированных узлов. При создании автоматической линии к отдельным агрегатным станкам добавляются транспортные системы, автоматизирующие подачу заготовок на вход линии, межстаночную транспортировку и выдачу готовых деталей на выходе автоматической линии.

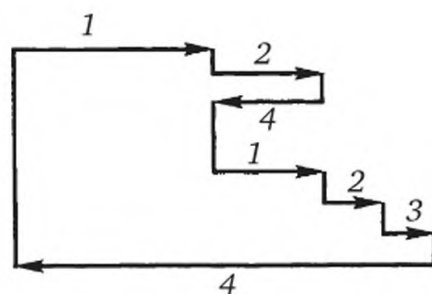


Рис. 15.3. **Схема варианта цикла глубокого сверления**

На рис. 15.4 показана принципиальная схема компоновки автоматической линии с использованием традиционных унифицированных узлов и с прохождением заготовки через рабочие зоны станков. Цифрой 1 обозначен сквозной конвейер для межстаночной транспортировки, а также для транспортировки на входе и на выходе, а цифрой 2 — станки.

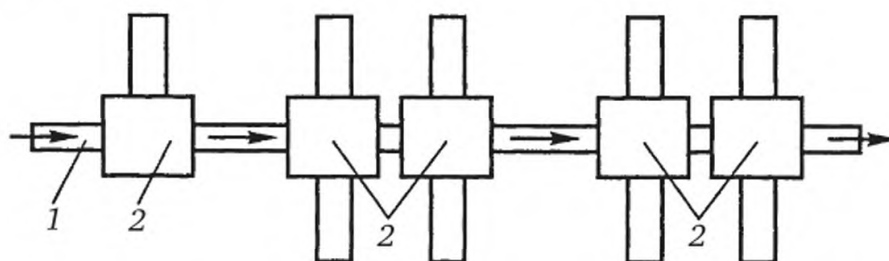


Рис. 15.4. **Компоновка автоматической линии из агрегатных станков с традиционными унифицированными узлами**

На рис. 15.5 приведена компоновка автоматической линии из агрегатных станков с традиционными унифицированными узлами с неоднократным прохождением заготовки через рабочие зоны станков и возвратом ее вместе с приспособлением-спутником к началу автоматической линии. Цифрой 1 обозначены станки, входящие в линию, цифрой 2 — межстаночный конвейер, а цифрой 3 — конвейер возврата приспособления-спутника к началу автоматической линии.

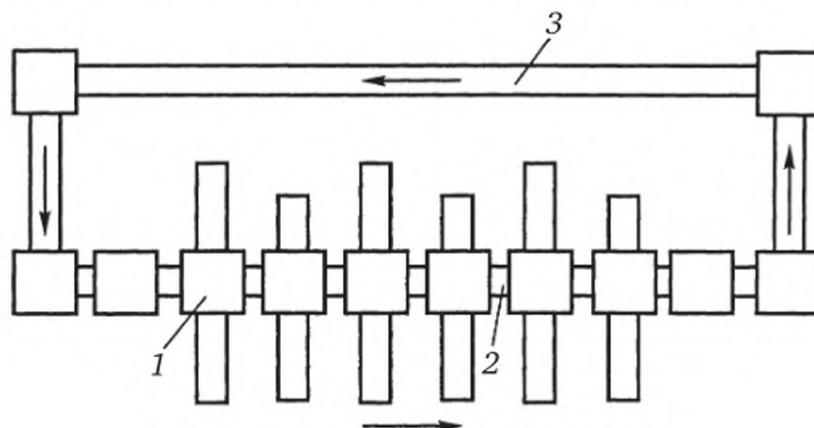


Рис. 15.5. **Компоновка автоматической линии с возможностью возврата приспособлений-спутников к началу обработки**

§ 15.2. Задание исходных технологических данных для автоматических циклов управления механообработкой

Программирование рабочего процесса для автоматического технологического оборудования циклического действия (автоматических линий и агрегатных станков) может производиться как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации. Если программирование рабочего процесса автоматического оборудования циклического действия производится на этапе проектирования, то на этапе эксплуатации это оборудование уже не может быть переналажено на другой рабочий цикл. Поэтому для технологического оборудования, оснащенного сменными упорами и/или кулачками различного профиля и по-разному установленными друг относительно друга, является весьма актуальным проектирование рабочего цикла именно на этапе эксплуатации этого оборудования.

Проектирование рабочего цикла подобного оборудования для получения детали, заданной ее рабочим чертежом, распадается на три этапа:

- составление схемы обработки;
- составление расчетного листа наладки;
- построение циклограмм.

Для составления схемы обработки и для перехода от нее к расчетному листу наладок рассмотрим описываемый в литературе пример изготовления из прутка на одношпиндельном токарно-револьверном автомате детали, рабочий эскиз которой приведен на рис. 15.6.

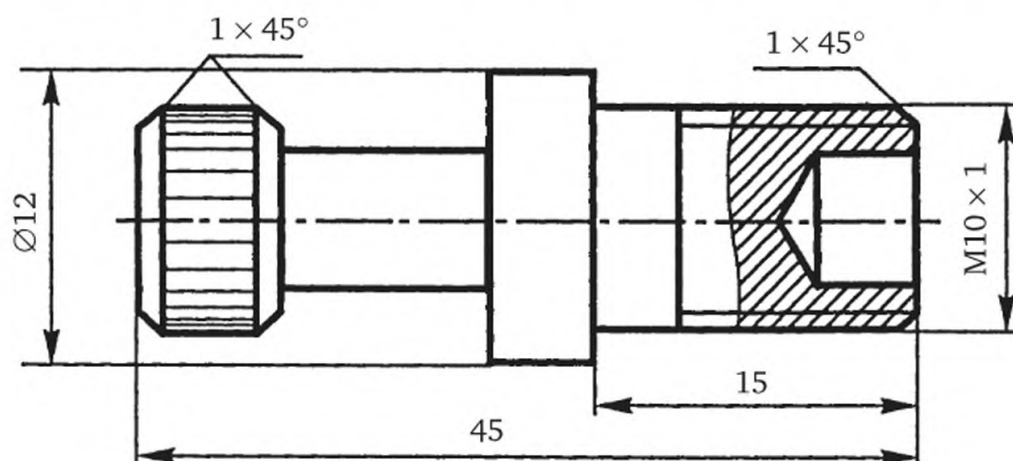


Рис. 15.6. Пример детали, изготавливаемой на токарно-револьверном автомате

Схема обработки этой детали изображена на рис. 15.7 и включает в себя шесть этапов.

I. Обработка детали начинается с поворота револьверной головки 1 в такую позицию, когда она оказывается обращенной к шпинделю регулируемым упором, и с подачи прутка-заготовки 2 до этого упора.

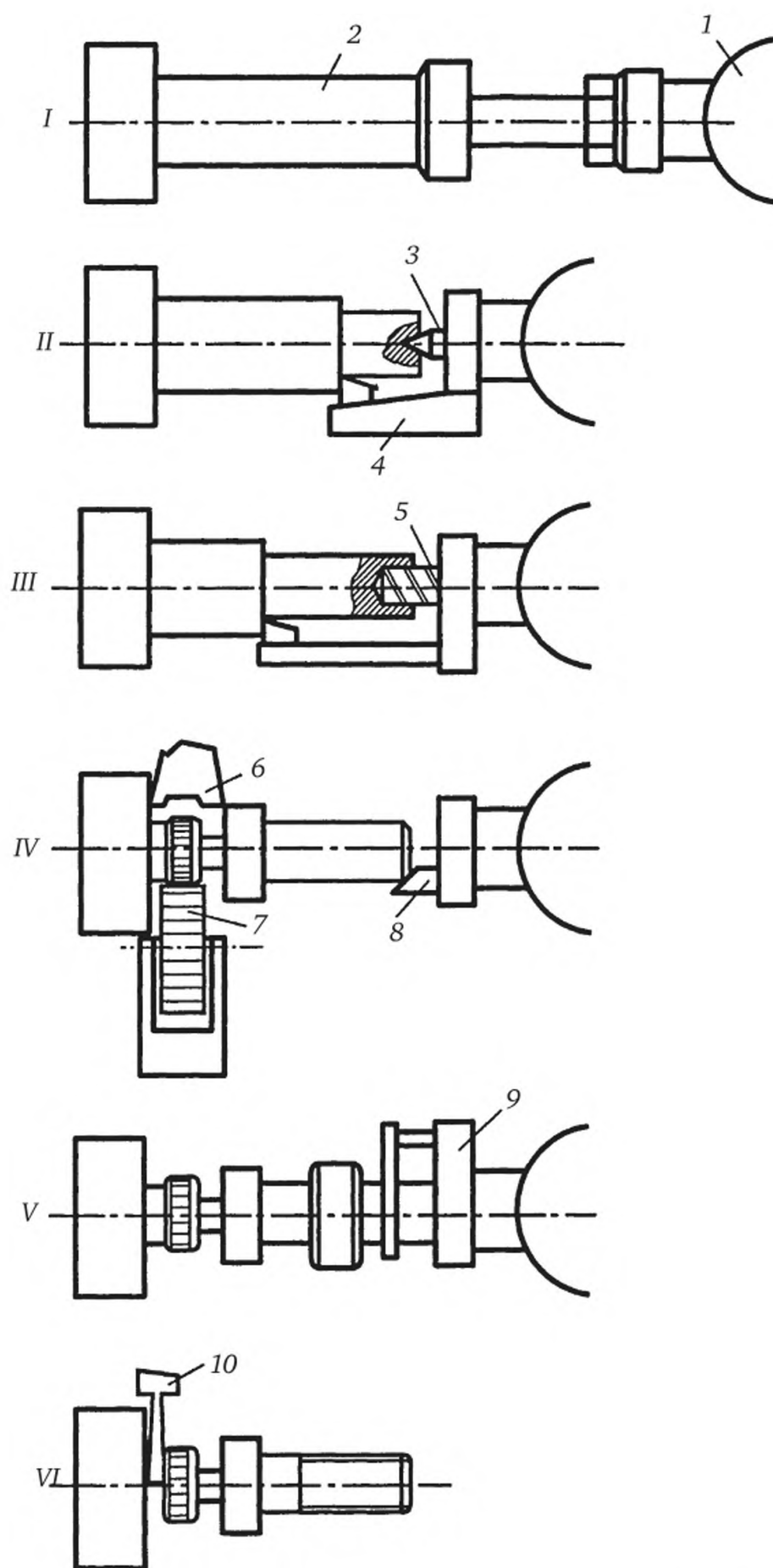


Рис. 15.7. Схема обработки на токарно-револьверном автомате

II. Затем револьверная головка поворачивается на следующую позицию, так что закрепленное в ней центровочное сверло 3 и проходной резец 4 оказываются обращенными к шпинделю. Резец 4 при подаче револьверной головки вдоль оси вращения заготовки производит ее наружную обточку, хотя и не на всю длину, а центровочное сверло осуществляет центровку заготовки.

III. На этом этапе после поворота револьверной головки обращенными к заготовке оказываются сверло 5 для окончательной обработки заданного на рабочем чертеже детали внутреннего осевого сверления и проходной резец 4. В результате движения револьверной головки по направлению к заготовке осуществляется ее окончательная наружная обточка на всю длину, заданную чертежом детали, и формирование внутреннего отверстия.

IV. Револьверная головка снова поворачивается, и осуществляется фасонная наружная обточка левой части поверхности детали с помощью профильного резца 6, установленного в заднем поперечном суппорте станка. Одновременно накатным роликом 7, установленным на переднем поперечном суппорте, делается накатка на головке детали, а резцом 8, установленным в револьверной головке, снимается фаска с правого конца заготовки.

V. После очередного поворота револьверной головки к детали оказывается обращенной самозатягивающаяся плашка 9, и при подаче револьверной головки на заготовку с помощью этой плашки нарезается наружная резьба $M10 \times 1$. Затем включается обратное вращение шпинделя, и при обратном ходе револьверной головки плашка свинчивается с нарезанной ею резьбы.

VI. Затем револьверная головка возвращается в исходное положение, и готовая деталь отрезается от прутка отрезным резцом 10, установленным на верхнем поперечном суппорте станка.

На этом цикл обработки одной детали заканчивается и может повториться на следующей детали.

Таким образом, чтобы в процессе эксплуатации подобного токарно-револьверного автомата спроектировать цикл обработки новой детали, заданной своим рабочим чертежом, необходимо *составить схему ее обработки* на данном автомате и построить профили сменных плоских кулачков, определяющих движения револьверной головки и поперечных суппортов станка. Для построения профилей указанных плоских кулачков и используются *расчетные листы наладки*, в которых указываются величины требуемых перемещений и законы, по которым они осуществляются. Обычно участок профиля кулачка для подачи режущего инструмента на заготовку выполняется по архимедовой спирали, а участок профиля кулачка для отвода режущего инструмента от заготовки выполняется по логарифмической спирали.

Что касается автоматических циклов, разработанных на этапе проектирования технологического оборудования, например агрегатных станков или автоматических линий, то на этапе эксплуатации такого

оборудования автоматический цикл, как правило, изменению не подлежит. Проектирование этого цикла на весь срок эксплуатации обычно осуществляется специалистом по электроавтоматике или гидроавтоматике в соответствии с заданием, полученным им от специалиста-технолога, определяющего тот технологический процесс, для реализации которого предназначена проектируемая единица технологического оборудования. В связи с этим очень важен вопрос о типизации той технологической информации, которая поступает к проектировщику и однозначно определяет схему управления этим циклом. Обычно схема управления циклом оказывается комбинированной электропневматической и состоит из электрических элементов, воспринимающих параметры элементов рабочего цикла и формирующих на основе преобразования полученной информации соответствующие управляющие воздействия, и гидравлических исполнительных механизмов, обладающих необходимыми кинематическими характеристиками, а также статическими и динамическими качествами.

Для задания технологической информации, необходимой для построения на этапе проектирования схем, реализующих те или иные автоматические циклы, можно использовать *циклограммы движений*, *циклограммы включений*, а также *специальные таблицы*.

Пример *циклограммы движений* приведен на рис. 15.8. На этой циклограмме изображены фактические движения рабочих органов (гидроцилиндров) многопозиционного агрегатного станка между двумя крайними положениями: исходным и предельным. Для компоновки этого станка характерно веерное расположение силовых головок. Столбцы циклограммы соответствуют дискретным моментам времени, определяемым началом или окончанием движения гидроцилиндра привода того или иного исполнительного механизма. Из этой циклограммы видно, что пока планшайба агрегатного станка остается зажатой (моменты времени между 1 и 6), можно осуществлять медленную рабочую подачу силовых головок с режущими инструментами до предельного положения (моменты времени между 1 и 5), а также их быстрый отвод в исходное положение (моменты времени между 5 и 6). Гидроцилиндр привода поворота планшайбы осуществляет медленное движение «захвата» (моменты времени между 1 и 6), подготавливающее последующий быстрый поворот планшайбы (моменты времени между 7 и 9), когда зажим с нее будет снят (моменты времени между 7 и 10). Пока планшайба будет зажата, можно осуществлять движения выгрузки детали (моменты времени между 1 и 3), а также загрузки новой заготовки (моменты времени между 3 и 6). На время рабочей подачи силовых головок включается подача СОЖ, а на время быстрого отвода силовых головок в исходное положение и их выстоя (моменты времени между 5 и 1) подача СОЖ отключается. Заметим, что при работе агрегатного станка по циклу после окончания очередного цикла все исполнительные органы должны возвращаться в исход-

ное положение, что отражается в том, что последний, 10-й интервал времени называется также нулевым.

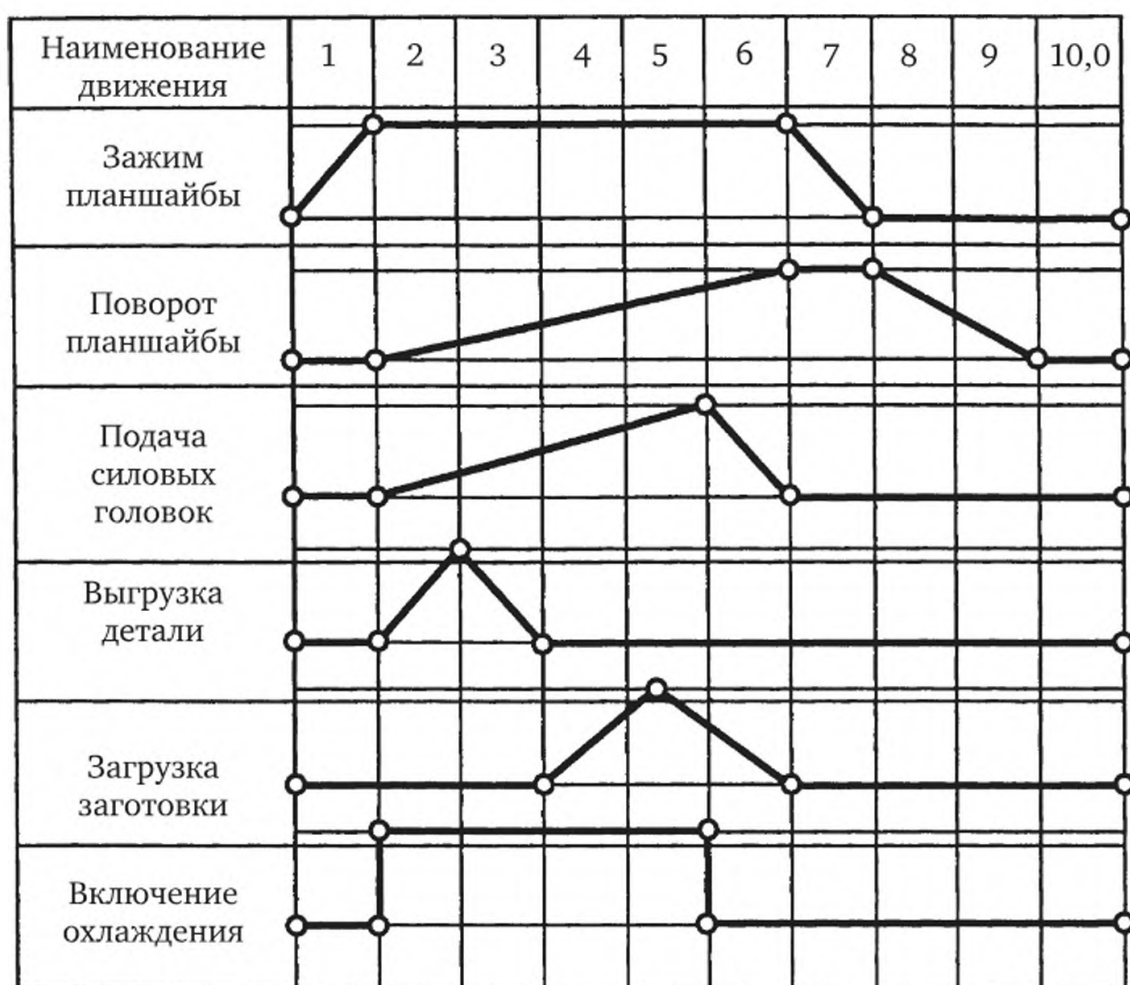


Рис. 15.8. Пример циклограммы движения для агрегатного станка

Задание исходной технологической информации для разработки схемы автоматического цикла с помощью циклограммы движения является наглядным, так как в этом случае непосредственно изображаются движения приводов исполнительных органов и указываются причинно-следственные зависимости между этими движениями. Однако здесь не указываются абсолютные времена выполнения тех или иных элементов рабочего цикла.

Этот недостаток отсутствует, если исходная технологическая информация о рабочем цикле задана в виде *циклограммы включений*. Пример такой циклограммы приведен на рис. 15.9. В циклограмме включений указано фактическое время, в течение которого тот или иной элемент должен быть включен.

Исходная технологическая информация об автоматическом цикле может быть также предоставлена в форме *специальных таблиц*. В них перечисляются сигналы на входе и на выходе системы управления циклом, указывается их характер (импульсный или потенциальный), перечисляются источники и адресаты этих сигналов.



Рис. 15.9. Задание исходной технологической информации о рабочем цикле с помощью циклограммы включений

§ 15.3. Автоматические циклы в функции пути и в функции времени

Система обработки и использования производственной информации при управлении циклами автоматических линий или агрегатных станков, а также циклами многопозиционных станков должна обеспечивать выполнение следующих функций.

1. Управление перемещениями обрабатываемых заготовок между рабочими позициями, а также их фиксацией на время обработки в приспособлениях. Эти действия выполняются механизмами транспортных и загрузочных устройств и систем, управляемых различными электрическими аппаратами или электроуправляемыми гидрозолотниками.

Перевод золотников импульсного действия из одного рабочего положения в другое обеспечивается подачей на соответствующий управляющий электромагнит сигнала определенной длительности, как правило, синусоидального напряжения. В отечественном технологическом оборудовании этот сигнал обычно имеет длительность 2...3 с при частоте 50 Гц.

Для переключения и удержания в новом рабочем положении золотников длительного действия используются электромагниты. При отключении их питания даже на непродолжительное время золотник самопроизвольно перемещается в другое положение.

2. Управление непосредственной обработкой заготовок, закрепленных на рабочих позициях. Вращение обрабатывающего инструмента (фрезы, сверла, метчика, плашки, центровального сверла и др.) обеспе-

чивается электродвигателем привода главного движения. Поступательное перемещение силовых головок осуществляется с помощью гидроцилиндров, управляемых гидрозолотниками импульсного действия. В ряде случаев для выполнения поступательных движений используется и электромеханический привод подачи.

3. Контрольную сигнализацию, блокировку и индикацию состояния исполнительных органов, в том числе сигнализацию об авариях и указание их причин. В начале смены, а также при повторном пуске после оперативного или аварийного снятия напряжения выполнению автоматического цикла должен предшествовать комплекс подготовительных операций, осуществляемых по командам от системы управления. Эти команды реализуют подачу напряжения, подачу звукового предупредительного сигнала и пуск электродвигателей.

После выполнения подготовительных операций система управления обеспечивает работу в *автоматическом* и *наладочном* режимах.

В *автоматическом режиме* система управления осуществляет последовательную реализацию элементов цикла, а также экстренную (т. е. внеочередную) реализацию отдельных переходов и движений с предварительной отменой некоторых команд из числа ранее выданных. Подобная необходимость может появиться в случае возникновения аварийных ситуаций и нарушения блокировок или в случае оперативного вмешательства персонала в управление. Обеспечивается также выполнение действий, необходимых для повторного пуска после нажатия кнопки «Аварийный стоп», повторение импульсных команд после нажатия оператором соответствующих кнопок, а также предотвращение самопроизвольного возобновления движений после перерыва в энергопитании.

В *наладочном режиме* система управления осуществляет выполнение отдельных выборочно назначаемых элементов цикла либо по командам с пульта управления, либо автоматически, если возникают аварийные ситуации или нарушения блокировок.

Система управления должна вырабатывать те или иные управляющие решения в ответ на поступающую производственную информацию. Пример такого общего случая входных и выходных сигналов системы управления приведен на рис. 15.10.

Задача любой системы управления независимо от физической природы получаемых и выдаваемых ею сигналов состоит в том, чтобы в данной ситуации (т. е. при том или ином внутреннем состоянии системы) в ответ на ту или иную комбинацию входных сигналов вырабатывать адекватную комбинацию выходных сигналов.

Это может быть представлено в табличной форме, как показано, например, в табл. 15.1. Таблица составлена для случая, когда проектируемая система управления рабочим циклом находится в состоянии «1», т. е. ее выходом является оператор А, (оператор с индексом 1, что означает согласно рис 15.10 запрос готовности).



Рис. 15.10. Пример входных и выходных сигналов системы управления автоматическим циклом технологического оборудования

Таблица 15.1

Один из вариантов поведения схемы управления циклом в состоянии запроса готовности

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	N
1	1	—	—	—	0	2
1	0	1	1	1	0	7
1	0	—	—	0	0	2
1	0	—	0	—	0	2
1	0	0	—	—	0	2
—	—	—	—	—	1	3
0	—	—	—	—	0	1

В столбцах аргументов проставлены те значения входных сигналов, которые в данной ситуации влияют на выбор выходного оператора. Наличие сигнала от аргумента соответствует 1, а его отсутствию соответствует 0. Прочерк в столбце аргумента означает, что в данной ситуации для выработки выходного сигнала не имеет значения, присутствует или отсутствует сигнал этого аргумента. В столбце, обозначенном N , проставляется индекс того оператора A , который в данной ситуации должен быть выработан системой управления в ответ на то или иное сочетание входных сигналов.

Этой таблице соответствует канонический граф, или иерархическое дерево решений, изображенное на рис. 15.11.

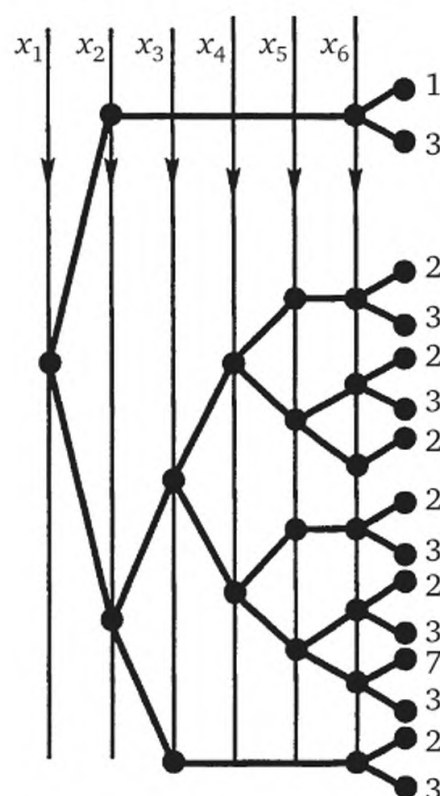


Рис. 15.11. Иерархическое дерево решений для системы управления циклом в состоянии запроса готовности

На этом графе сверху в виде строки расположены те аргументы, которые так или иначе в данном состоянии влияют на выходной сигнал, вырабатываемый автоматической системой управления рабочим циклом. Ответом на наличие соответствующего сигнала на входе схемы является ветвь на дереве решений, направленная вниз. Ответом на отсутствие сигнала на входе схемы является ветвь на дереве решений, направленная вверх.

Если не имеет значения, присутствуют или отсутствуют соответствующие сигналы на входе схемы, то этому соответствует горизонтальная ветвь на дереве решений.

Таким образом, схема автоматического управления рабочим циклом в ответ на информационные сигналы, поступающие в данном состоянии на ее вход, должна вырабатывать решения, изображающиеся той или иной ломаной траекторией на иерархическом дереве решений.

Вопрос заключается в том, откуда поступают информационные сигналы на систему автоматического управления рабочим циклом и каким образом они вырабатываются.

В зависимости от того, что является источником информационных сигналов, поступающих на схему автоматического управления рабочим циклом, различают *управление в функции пути* и *управление в функции времени*.

Если источниками информационных сигналов, поступающих на вход логической переключательной схемы, осуществляющей управление рабочим циклом, являются различного рода путевые выключатели: контактные или бесконтактные, электрические, гидравлические, пневматические или комбинированные, установленные на пути перемещения рабочих исполнительных органов, то имеет место *управление в функции пути*. Заметим, что «перемещение» здесь следует понимать в широком смысле. Сюда же можно отнести изменение любого параметра, определяющего протекание технологического цикла, например изменение давления в гидросистеме, определяемое предельным датчиком — реле давления.

Если же источниками информационных сигналов, поступающих на вход логической переключательной схемы, осуществляющей управление рабочим циклом, являются различного рода задатчики времени, например жестко закрепленные путевые микровыключатели, на которые воздействуют определенным образом спрофилированные и взаимно ориентированные кулачки, установленные на валу вращающегося с постоянной скоростью нерегулируемого электродвигателя, являющегося задатчиком времени, то в таком случае имеет место *управление в функции времени*.

§ 15.4. Релейно-контактные схемы для обеспечения автоматических циклов

Элементной базой для реализации систем управления станков, кузнечно-прессовых машин и другого технологического оборудования релейного действия являются электрические аппараты, т. е. устройства, предназначенные для управления и защиты электрических цепей и машин, а также для контроля и регулирования преобразованных в электрические величины неэлектрических параметров технологических процессов. Классификация электрических аппаратов, применяющихся для этих целей, приведена на рис. 15.12.

Рассмотрим элементы этой классификации подробнее.

Кнопки, т. е. *кнопочные выключатели (переключатели)*, представляют собой коммутационный аппарат, предназначенный для многократного включения и отключения электрических цепей. Кнопочные выключатели могут классифицироваться по способу возврата в исходное состояние, по способу осуществления переключающего движения и по виду органа управления. Соответствующая классификация кнопочных выключателей приведена на рис. 15.13.

Наиболее распространенными в отечественном электрооборудовании станков до последнего времени являлись кнопочные выключатели, рассчитанные на номинальное напряжение 600 В переменного тока с частотой 50 Гц и напряжения 220 и 440 В постоянного тока. Количество контактов может при конкретном применении изменяться в пределах до четырех замыкающих и четырех размыкающих контактов.



Рис. 15.12. Классификация электрических аппаратов

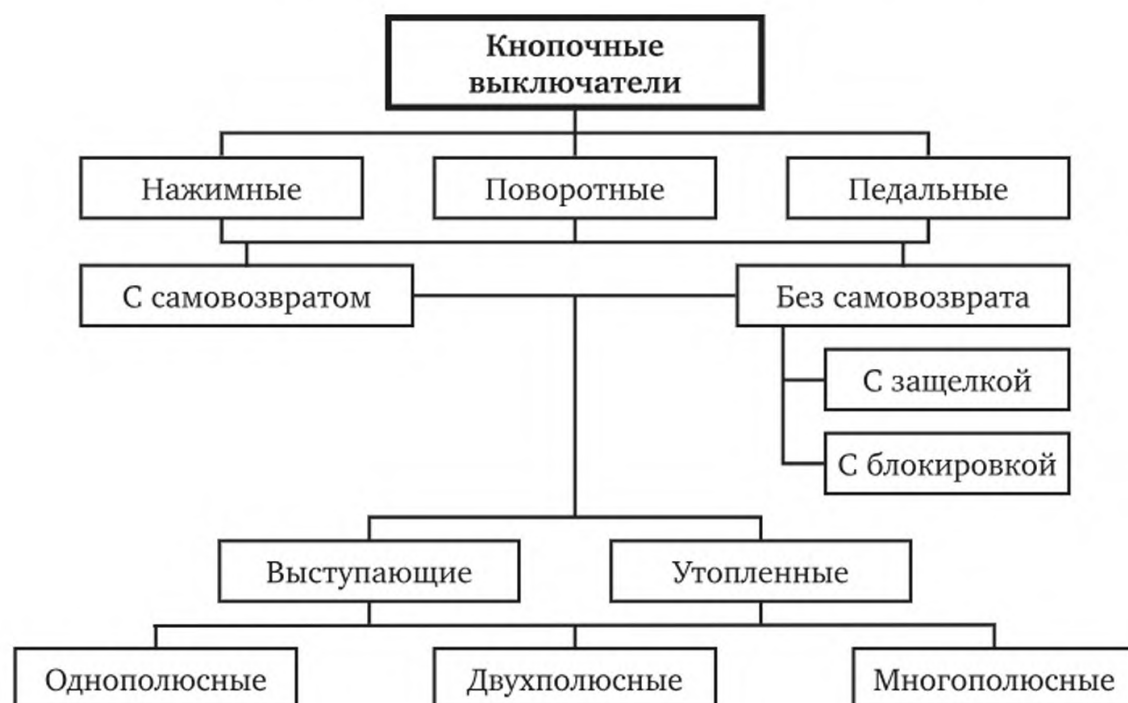


Рис. 15.13. Классификация кнопочных выключателей

Для коммутации цепей управления и маломощных силовых нагрузок используются пакетно-кулачковые переключатели. Универсальные

переключатели такого типа могут также использоваться как контроллеры для коммутации обмоток многоскоростных электродвигателей.

Путевые выключатели (переключатели), контактные и бесконтактные, а также представляющие собой микровыключатели (т. е. выключатели с малой величиной хода элемента, на который производится механическое воздействие) служат для коммутации электрических цепей под воздействием движения подвижных исполнительных органов машин и механизмов, перемещающихся относительно их.

Путевые выключатели делятся на три группы:

- *прямого действия*, у которых время переключения и сила контактного нажатия зависят от положения и скорости перемещения органа, осуществляющего воздействие (предназначены для легких условий работы);
- *полумгновенного действия*, у которых время переключения практически не зависит от положения и скорости перемещения органа, осуществляющего воздействие, но сила контактного нажатия зависит от них (предназначены для обычных условий работы);
- *мгновенного действия*, у которых и время переключения, и сила контактного нажатия не зависят от положения и скорости перемещения органа, осуществляющего воздействие (предназначены для тяжелых условий работы).

Все путевые выключатели используют самые разнообразные органы, осуществляющие воздействие, прямое или опосредствованное, на контактные группы. Такими органами могут быть толкатели, толкатели с роликом, толкатели с рычажной системой, толкатели с рычажной системой и с роликами, с рычагом регулируемой длины, с селективным воздействием и др.

Кроме отдельных путевых выключателей используются также блоки микровыключателей, встроенных в общий корпус. Каждый выключатель блока должен при этом работать от своего органа, осуществляющего механическое воздействие.

Бесконтактные путевые выключатели, как и контактные, осуществляют коммутацию электрических цепей в функции пути, но у них отсутствует механический контакт. Чувствительный элемент такого путевого выключателя может быть индуктивного или емкостного типа. Их номинальное напряжение питания обычно составляет 12 и 24 В постоянного тока, но современные аппараты такого рода могут работать и в более широком диапазоне напряжений: от 10 до 30 В. Эти выключатели коммутируют цепи, содержащие реле и логические элементы. Расстояние от чувствительного элемента бесконтактного путевого выключателя до управляющего элемента обычно составляет 1 мм, а в некоторых случаях может достигать до 20 мм. Частота коммутации бесконтактного путевого выключателя может достигать до 1000 Гц.

Бесконтактные логические элементы (так называемые элементы твердотельной логики) — это коммутационные устройства, предназначенные для скачкообразных изменений электрических параметров

в управляемых цепях под влиянием тех или иных значений электрических воздействий.

Электромагнитные реле, так же как и бесконтактные логические элементы, осуществляют скачкообразную коммутацию в управляемых цепях под влиянием тех или иных значений электрических воздействий, но их работа основана на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки с подвижным ферромагнитным элементом (якорем). Электромагнитные реле могут использоваться для передачи и размножения электрических команд, а также для изменения их параметров.

Электромагнитные реле, имеющие два коммутационных положения, соответствующие двум значениям входной величины, называются *промежуточными реле*. Это название связано с тем, что в цепях управления такие реле занимают промежуточное место между командными и исполнительными аппаратами.

Электромагнитные реле могут быть классифицированы по следующим признакам:

- по току катушки управления (реле постоянного и переменного тока);
- по способу включения катушки управления (реле шунтовые, напряжения и токовые);
- по величине номинального тока;
- по величине номинального коммутируемого напряжения;
- по количеству и сочетанию коммутируемых контактов;
- по виду коммутируемых контактов (с воздушными или герметизированными магнитоуправляемыми контактами).

В электрооборудовании станков используются главным образом шунтовые промежуточные реле. Для коммутации больших уровней токов и напряжений целесообразно применять реле-контакты.

В станкостроении достаточно широкое применение нашли реле с герметизированными магнитоуправляемыми контактами (так называемые *герконы*). Принципиально геркон представляет собой герметичную, обычно стеклянную, ампулу, в которой находится перекидной контакт. Ампула заполнена газом, чаще всего водородом. Снаружи ампулы устанавливается катушка. При прохождении по этой катушке тока возникающее магнитное поле вызывает переключение контакта, находящегося внутри ампулы.

Такие реле обладают следующими достоинствами:

- высокая механическая износостойкость (от 10 до 100 млн циклов включений/отключений);
- высокое быстродействие, надежная коммутация, высокая степень защиты контактов;
- сравнительно малые размеры и потребляемая мощность;
- простота согласования с транзисторными устройствами.

По коммутируемой мощности различают герконы весьма малой мощности (до 0,01 А при напряжении до 36 В), малой мощности

(до 0,25 А при напряжении до 24 В), средней мощности (до 0,5 А при напряжении до 24 В) и большой мощности (до 4 А при напряжении 380 и 220 В).

Реле времени предназначены для передачи электрических команд через определенные заданные и регулируемые промежутки времени.

Применяемые в механообработке реле времени разделяются по следующим признакам:

- по принципу действия (пневматические, электронные, моторные);
- по числу выходных цепей с независимыми уставками выдержек времени (одно-, двух- и трехвыходные);
- по способу задания команд, управляющих одним выходом (однокомандные, программные, циклические);
- по виду управляющей команды (управляемые включением либо отключением питающей сети, управляемые специальной командой при предварительно поданном напряжении питания);
- по виду выходной цепи (с контактным или с бесконтактным выходом);
- по точности и величине погрешности задания выдержки времени;
- по количеству диапазонов выдержек времени.

К *исполнительной аппаратуре* относятся различного рода электромагнитные контакторы и пускатели, а также электромагниты управления.

Электромагнитные контакторы предназначены для включения и отключения потребителей электрической энергии.

Электромагнитные пускатели — это контакторы, предназначенные для пуска и останова различных электродвигателей, в том числе и трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Электромагнитные пускатели обычно комплектуются устройством для защиты электродвигателя от перегрузки током недопустимо большой величины.

Электромагнитные пускатели имеют различные области применения и характеризуются режимом их использования. Одним из таких режимов является наиболее распространенный в станкостроении режим, которым допускается шестикратное превышение включаемого тока по отношению к отключаемому при частоте коммутации 2400...3600 включений в час.

Электромагниты управления предназначены для осуществления прямолинейных перемещений различных компонентов машин и отдельных устройств.

Электромагниты могут различаться между собой по величине и по виду тока управляющей катушки, по напряжению катушки, по тяговому усилию, по величине номинального хода, по виду воздействия на нагрузку (тянущие и толкающие) и др.

В станкостроении до последнего времени наиболее широко применялись электромагниты переменного тока, которые могут питаться

от трансформаторов или непосредственно от сети и имеют большее быстроедействие, чем электромагниты постоянного тока. Однако в последнее время электромагниты постоянного тока все более широко применяются в станкостроении в силу их большей надежности и более удобного сочетания с электронными устройствами.

Толкающие электромагниты обычно используются для переключения гидравлических и пневматических устройств, а тянущие — для перемещения различных компонентов машин и отдельных устройств.

Электромагниты постоянного тока могут быть использованы и как тянущие, и как толкающие, а их якорь допускает связь как с грузом, так и с толкателем, работающим на нагрузку типа пружины.

К **аппаратуре защиты** относятся:

- *автоматические выключатели*, предназначенные для включения и отключения тока при нормальных условиях работы, а также для автоматического отключения токов короткого замыкания и перегрузки;
- *плавкие предохранители* — коммутационные аппараты одноразового действия, предназначенные для отключения защищаемой ими цепи;
- *тепловые реле* — коммутационные аппараты многократного действия, предназначенные для защиты от перегрузок электродвигателей, а иногда и кабелей.

В **цепях управления** в механообработке используются:

- *трансформаторы*, однофазные и трехфазные, предназначенные для питания номинальным напряжением цепей управления, для электродинамического торможения электроприводов, для местного освещения, для сигнализации и питания выпрямителей цепей управления;
- *светосигнальная аппаратура* и различного рода *светофоры*, предназначенные для индикации состояния рабочих органов станка и его электрооборудования, а также для аварийной и предупреждающей световой сигнализации;
- *блоки зажимов и электрические соединители*, предназначенные для соединения и разветвления проводов силовых цепей и цепей управления технологическим оборудованием.

Контрольные вопросы

1. Какой режим управления называется ручным?
2. Какой режим управления называется автоматическим?
3. Что называется циклом работы автоматического устройства?
4. Какие различаются типы устройств, реализующих автоматические циклы?
5. Что называется автоматической линией с жесткой связью?
6. Что называется автоматической линией с гибкой связью?
7. Что называется агрегатным станком?
8. Из каких унифицированных узлов строятся агрегатные станки?
9. Какими бывают силовые узлы агрегатных станков?
10. Какими бывают шпиндельные узлы агрегатных станков?
11. Какими бывают базовые узлы агрегатных станков?

12. Какими бывают транспортные узлы агрегатных станков?
13. Как агрегатные станки классифицируются по мощности?
14. Какие агрегатные станки называют однопозиционными?
15. Какие агрегатные станки называют многопозиционными?
16. Какие существуют типовые компоновки агрегатных станков?
17. Какие существуют типовые рабочие циклы агрегатных станков?
18. Как из агрегатных станков komponуется автоматическая линия со сквозным проходом детали через зону обработки?
19. Как из агрегатных станков komponуется автоматическая линия с возвратом детали в приспособлении-спутнике к началу обработки?
20. Какие существуют принципиально разные задачи в управлении автоматическими циклами?
21. В чем заключается программирование рабочего цикла на этапе эксплуатации переналаживаемого автомата циклического действия?
22. Что такое схема обработки для переналаживаемого автомата циклического действия?
23. Что такое расчетный лист наладки для переналаживаемого автомата циклического действия?
24. По какой кривой профилируется сменный плоский кулачок переналаживаемого автомата циклического действия для подвода рабочего органа к заготовке?
25. По какой кривой профилируется сменный плоский кулачок переналаживаемого автомата циклического действия для отвода рабочего органа от заготовки?
26. Для чего нужно однозначное задание технологических исходных данных на этапе проектирования автоматического оборудования циклического действия?
27. Что такое циклограмма движений, каковы ее достоинства и недостатки?
28. Что такое циклограмма включений, каковы ее достоинства и недостатки?
29. Что должно быть указано в специальной таблице для задания исходных технологических данных по проектируемому рабочему циклу?
30. В чем заключается управление перемещениями заготовки между рабочими позициями автоматических линий и агрегатных станков?
31. В чем заключается управление обработкой заготовки на рабочих позициях автоматических линий и агрегатных станков?
32. В чем заключается управление контрольной сигнализацией при обработке заготовки на автоматических линиях и агрегатных станках?
33. В чем формально состоит основная задача системы управления автоматическим циклом?
34. Как требования к функционированию системы управления автоматическим циклом могут быть заданы в табличной форме?
35. Что такое иерархическое дерево решений?
36. Как на дереве решений представляется выбор, сделанный системой управления?
37. Как формируются входные сигналы системы управления автоматическим циклом при управлении в функции пути?
38. Как формируются входные сигналы системы управления автоматическим циклом при управлении в функции времени?
39. Что является элементной базой для реализации систем управления станков и другого технологического оборудования циклического действия?
40. На какие категории делятся все электрические аппараты, применяющиеся для реализации систем управления станками и другим технологическим оборудованием циклического действия?

41. Что относится к командной аппаратуре?
42. Что относится к исполнительной аппаратуре?
43. Что относится к аппаратуре защиты?
44. Что относится к аппаратуре управления?
45. На какие категории делятся кнопочные выключатели (переключатели)?
46. Как устроены и работают различные категории путевых выключателей?
47. На какие категории делятся электромагнитные реле?
48. Какие принципы используются при построении бесконтактных логических элементов?
49. Что такое электромагнитные контакторы?
50. Что такое электромагнитные пускатели?
51. Для чего в технологическом машиностроительном оборудовании применяются электромагниты?
52. Какие разновидности электромагнитов применяются в технологическом машиностроительном оборудовании?
53. Для чего в технологическом машиностроительном оборудовании применяются автоматические выключатели?
54. Для чего в технологическом машиностроительном оборудовании применяются плавкие предохранители и тепловые реле?
55. Для чего в технологическом машиностроительном оборудовании применяются трансформаторы?
56. Для чего в технологическом машиностроительном оборудовании применяется светосигнальная аппаратура?
57. Для чего в технологическом машиностроительном оборудовании применяются блоки зажимов и электрические распределители?

Глава 16

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ КОМАНДОКОНТРОЛЛЕРОВ

§ 16.1. Архитектурные принципы построения программируемых командоконтроллеров

Традиционно управление автоматическими циклами работы технологического оборудования осуществлялось с помощью схем релейно-контактной автоматики. Такое решение хотя и обеспечивает выполнение всех требуемых функций, в то же время обладает и рядом принципиальных недостатков.

Основными из этих недостатков являются:

- необходимость для каждого объекта автоматизации индивидуальной разработки своей принципиальной релейно-контактной схемы;
- необходимость разработки конструкторской документации на релейно-контактное устройство, реализующее данную принципиальную схему, включая выбор типовых конструктивов (шкафов, субблоков, панелей, пультов, разъемов, коробов и т. п.), серийно выпускаемых и доступных электрических аппаратов, соответствующих данной принципиальной схеме, выпуск сборочных и рабочих чертежей, а также спецификаций;
- необходимость разработки технологической документации на данное конкретное релейно-контактное устройство, включая разработку маршрутной и операционной технологии изготовления и сборки, составление спецификаций и заказ стандартного режущего и вспомогательного инструмента, конструирование специального режущего и вспомогательного инструмента;
- необходимость подготовки и организации производства данного релейно-контактного устройства, включая выбор и организацию отношений с поставщиками, создание необходимых запасов сырья и комплектующих изделий, планирование и организацию производственного процесса;
- необходимость выполнения всего производственного цикла данного конкретного устройства, включая изготовление компонентов, сборку и подсборку, осуществление всего объема монтажных работ;

- необходимость проведения испытаний на функциональное соответствие, надежность, эргономичность, включая разработку программы и методики испытаний, а также проектирование, изготовление и проверку испытательных стендов;
- значительные габариты и энергопотребление;
- отсутствие формализованных методов и средств для диагностирования и локализации неисправностей;
- потенциальная ненадежность, связанная с большим числом электрических контактов.

Первым шагом на пути перехода к более высокому техническому уровню систем управления автоматическими циклами стали попытки прямой замены элементов релейно-контактных схем их бесконтактными эквивалентами (так называемыми элементами твердотельной логики — «Solid State»). Отдельные реле при этом непосредственно заменялись функционально аналогичными логическими переключательными элементами, обычно феррит-транзисторными ячейками (ФТЯ). Однако применение ФТЯ исключало лишь один недостаток релейно-контактных схем, а именно их потенциальную ненадежность, связанную с наличием большого количества контактов. Все же остальные недостатки сохранялись, и к ним добавлялись новые. Эти дополнительные недостатки прежде всего были связаны с трудностями наладки и диагностирования в связи с отсутствием визуализации срабатывания или несрабатывания элементов, а также с трудностями «размножения» сигналов. В традиционных релейно-контактных схемах такое «размножение» обеспечивалось наличием нескольких пар контактов у одного реле.

Поэтому наряду с новой элементной базой потребовались и новые архитектурные принципы построения систем управления автоматическими циклами. Здесь под архитектурой дискретного вычислительного управляющего устройства будем понимать его структуру, какой она представляется программисту. Создание современных систем управления, не имеющих вышеперечисленных недостатков, стало возможным только с появлением специального универсального устройства — программируемого логического контроллера (ПЛК), называемого также программируемым командоконтроллером. В англоязычной литературе подобное устройство называется PLC — Programmable Logical Controller.

ПЛК представляет собой универсальное цифровое устройство. На управление конкретным циклом его настраивают, вводя в его память соответствующую рабочую программу (совокупность операторов), требуемым образом согласующую между собой содержимое адресов памяти, связанных со входными и выходными сигналами объекта управления.

ПЛК построен по тем же архитектурным принципам, что и универсальная цифровая вычислительная машина. Он содержит все ее характерные функциональные блоки, как показано на рис. 16.1.

Вместе с тем программируемый логический контроллер (ПЛК) обладает и существенными особенностями. Перечислим их.

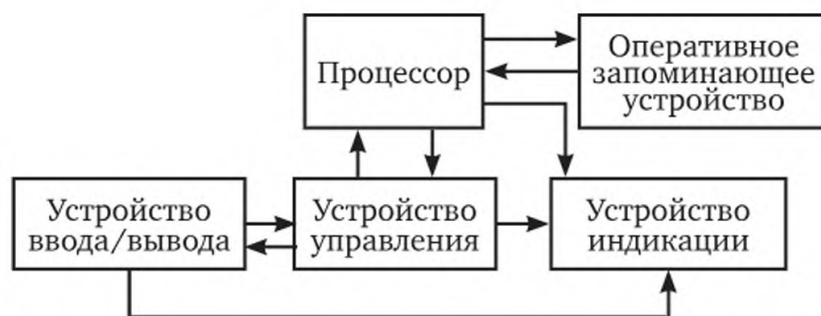


Рис. 16.1. Архитектура программируемого логического контроллера

1. Разрядная сетка ПЛК содержит в принципе лишь один разряд (обладает длиной, равной 1). Это значит, что предусматривается обработка не чисел, заданных пакетами сигналов в цифровом коде, а отдельных дискретных сигналов о срабатывании или несрабатывании тех или иных рабочих органов (сигналов типа 0 или 1). Результатом произведенной обработки сигналов являются также дискретные сигналы 1 или 0 («включить» или «выключить»), адресованные соответствующему исполнительному механизму.

2. Минимально необходимая система команд ПЛК может быть ограничена несколькими логическими операциями. Таковыми в случае использования так называемого нормального логического базиса являются три операции: дизъюнкция (соответствующая параллельному соединению), конъюнкция (соответствующая последовательному соединению) и отрицание (соответствующее инвертирующему контакту). Используя формулы двойственности, можно ограничиться не тремя названными операциями, а двумя, например дизъюнкцией и отрицанием или же конъюнкцией и отрицанием. Наличие таких операций позволяет создавать программные эквиваленты любых релейно-контактных структур, поскольку соответствует всем имеющимся в них элементам — параллельному и последовательному соединениям и инвертирующему контакту.

3. Язык программирования на входе основан на представлении команд либо в виде булевых операторов (операторов алгебры логики), либо в виде соответствующих им графических символов релейно-контактных схем.

4. Входными и выходными данными процесса вычислений являются не массивы алфавитно-цифровой информации, вводимой и редактируемой персоналом до начала или по окончании процесса вычислительной обработки этих массивов и вне связи с объектом управления (режим «off line»), а дискретные одноразрядные сигналы обмена данными с объектом управления. Эти сигналы либо поступают в контроллер по мере их появления в объекте управления, либо генерируются самим контроллером в процессе вычислений (режим «on line»).

Существенной и неотъемлемой особенностью ПЛК является поэтому наличие в их составе устройств ввода и вывода сигналов с параметрами, используемыми в данном конкретном объекте управления.

Сигналы могут поступать на входы ПЛК от концевых выключателей, контролирующих положение подвижных рабочих органов на различных участках их перемещения, от оперативных устройств, используемых персоналом (кнопок и кнопочных переключателей и т. п.), от реле давления, контролирующих давление масла в соответствующих полостях гидро- и пневмосистем, от блок-контактов пускателей, коммутирующих силовые цепи питания электродвигателей, от внутренних запоминающих элементов и др. Все эти источники сигналов являются электрическими контактными или бесконтактными устройствами.

Выходные сигналы ПЛК поступают на исполнительные элементы объекта управления: усилители мощности, управляемые коммутирующие ключи, реле, пускатели, электроуправляемые пневмо- и гидрозолотники, тормозные и зажимные механизмы, муфты, устройства индикации типа сигнальных лампочек, светофоров, транспарантов, табло и др.

Устройство занесения программы в ПЛК для управления конкретным объектом не обязательно должно быть неотъемлемой частью данного ПЛК. Оно может быть портативным или возимым и подсоединяться к ПЛК только на время занесения в него программы управления.

Для индикации текущего хода процесса управления может быть спроектировано специальное табло или пульт управления, соединяемый с ПЛК, но может использоваться и универсальный монитор, входящий в состав ПЛК.

§ 16.2. Привязка программируемых командоконтроллеров к конкретному оборудованию механообработки

Программируемый командоконтроллер (названный ранее ПЛК) решает для изготовителя так называемую проблему серийности и номенклатуры. Эта проблема заключается в том, что изделие, необходимое заказчику для того или иного конкретного объекта управления, не требует выпуска ПЛК большой серией, что невыгодно изготовителю. Решением проблемы является выпуск большой серии универсальных устройств, которые «привязываются» к конкретному объекту силами самих заказчиков, владельцев данного конкретного объекта управления.

Комплекты устройств связи с объектом (входных и выходных устройств ПЛК) komponуются по агрегатно-модульному принципу. Они состоят из нескольких блоков, каждый из которых имеет ряд зажимов для подводов входных и выходных сигналов.

Для заказа того или иного программируемого командоконтроллера анализируют объект управления и определяют суммарное число P входов и выходов данного объекта. В зависимости от этого числа различают малые ПЛК ($P = 16...64$), средние ($P = 128...512$) и большие ($P = 1024...2048$ и более).

Самыми распространенными являются средние ПЛК, что соответствует их использованию на агрегатных станках и наиболее распространенных автоматических линиях. Малые ПЛК обычно применяются для управления не слишком сложными промышленными роботами, а также работают в составе систем числового программного управления (ЧПУ) станками типа «обрабатывающий центр», где они управляют циклами автоматического поиска и смены режущего инструмента. Большие ПЛК могли бы использоваться для управления сложными автоматическими линиями, но здесь их использование ограничено трудностями организации производственного процесса. Такую сложную линию с точки зрения удобства эксплуатации целесообразно разделять на независимые участки, каждый из которых управляется своей системой (своим ПЛК), а между собой эти участки увязываются через общую систему управления более высокого уровня.

Вопрос состоит в том, как задать исходные технологические данные, описывающие данный объект и удобные для использования с целью программирования ПЛК.

Процедура программирования ПЛК применительно к конкретному объекту сводится к следующему:

- по конструктивным соображениям производят распределение источников и адресатов по входным и выходным субблокам (модулям), что отражается в составлении так называемой карты коммутации, и присваивают модулям внутрисистемные номера, под которыми они будут фигурировать в булевых или графических соотношениях, связывающих входы и выходы ПЛК (составляется так называемая таблица соединений);
- составляют и заносят в память ПЛК последовательность булевых соотношений или соответствующих им символов релейно-контактных схем, определяющих причинно-следственные зависимости между выходами и входами ПЛК;
- осуществляют установку ПЛК на объекте управления, производят трассирование входных и выходных кабельных соединений, осуществляют физическую прокладку кабельных соединений и коммутацию входов и выходов ПЛК с объектом управления в соответствии с картами коммутации;
- заносят в память ПЛК его рабочую программу, задаваемую в виде булевых соотношений или в виде графических символов принципиальных релейно-контактных схем;
- запускают занесенную в память ПЛК рабочую программу в старто-стопном режиме, просматривая и проверяя реакцию ПЛК на совершение объектом управления тех или иных операций автоматического рабочего цикла, и выполняют необходимое редактирование;
- после редактирования и отладки рабочей программы ПЛК ее запускают в автоматическом цикле.

Аргументы булевых соотношений, соответствующие входам ПЛК (однозначно определяющие сигналы, поступающие с объекта управле-

ния), обозначаются X_k , где k — внутрисистемный номер данного аргумента. Функции, получаемые в результате применения булевых соотношений, соответствуют выходам ПЛК, т. е. сигналам, передающимся для исполнения на объект управления, и обозначаются Y_s , где S — внутрисистемный номер данного выходного сигнала.

Пример внутрисистемной таблицы соединений входов некоторого ПЛК приведен на рис. 16.2.

Источник сигнала на схеме объекта управления	Наименование сигнала	Характер сигнала		Обозначение сигнала в системе
		Импульсный	Потенциальный	
Кнопка КН1	Начальный пуск	—	+	X_{10}
Кнопка КН2	Стоп системы	—	+	X_{20}
Концевой выключатель ПВ1	Исходное положение силовой головки	+	—	X_{35}
Концевой выключатель ПВ2	Промежуточное положение силовой головки	+	—	X_{40}
Концевой выключатель ПВ3	Конечное положение силовой головки	+	—	X_{45}

Рис. 16.2. Пример таблицы соединений входов ПЛК

Будем иметь в виду, что импульсным сигналом здесь называется сигнал, который появляется при подаче входного воздействия и исчезает вместе с ним, так что не требуется подачи специального второго воздействия, снимающего этот входной сигнал. Потенциальным же сигналом будем здесь называть такой сигнал, для снятия которого требуется подача специального второго воздействия. При таком толковании характер сигнала, т. е. импульсный он или потенциальный, определяется не длительностью этого сигнала, а лишь тем, сколько воздействий (два или одно) требуется для возникновения и снятия этого сигнала. Может существовать импульсный сигнал значительной длительности и, наоборот, весьма короткий потенциальный сигнал.

Пример внутрисистемной таблицы соединений выходов ПЛК приведен на рис. 16.3.

Здесь сигнал на выходе ПЛК поступает не от объекта, а порождается самим ПЛК. Он существует, пока рабочей программой ПЛК не будет выработан другой сигнал, который вызовет его снятие. Поэтому все сигналы на выходе ПЛК в данном случае следует считать потенциальными и не оговаривать это специально в таблице соединений выходов.

Адресат сигнала на схеме объекта управления	Наименование сигнала	Обозначение сигнала в системе
Электроуправляемый гидрозолотник ЭМ1	Быстрая подача вперед	Y_1
Электроуправляемый гидрозолотник ЭМ2	Рабочая подача вперед	Y_2
Электроуправляемый гидрозолотник ЭМ3	Быстрая подача назад	Y_3

Рис. 16.3. Пример таблицы соединений выходов ПЛК

Для примера составим заносимое в память ПЛК булево соотношение, соответствующее простому случаю типового рабочего цикла головок, который в словесном виде формулируется следующим образом:

«При осуществлении начального пуска, если не произошло нажатия на кнопку «СТОП» и если силовая головка находится в исходном положении, то она должна прийти в движение и на быстрой подаче двинуться в направлении к заготовке. Приблизившись к заготовке, что отмечается сигналом с промежуточной позиции, силовая головка должна переключиться на более медленную рабочую подачу и продолжать двигаться в том же направлении, пока она не дойдет до конечного положения, что определяется сигналом с путевого выключателя, установленного в конце пути силовой головки. Под воздействием сигнала с этого концевого выключателя силовая головка должна реверсироваться и на быстром ходу вернуться в исходное положение. Факт возвращения силовой головки в исходное положение определяется по сигналу с концевого выключателя, являющегося датчиком исходного положения».

Такое словесное задание условий срабатывания управляющих элементов однозначным образом определяет взаимосвязи и логику работы управляющей системы. Однако здесь такое словесное задание приведено лишь для примера. Практически условия срабатывания управляющих элементов являются значительно более сложными и логически более «длинными». Задание условий работы в словесной форме в большинстве случаев не упрощает, а усложняет их восприятие. Главным же недостатком словесной формы задания условий срабатывания является отсутствие верификации, т. е. самопроверки условий срабатывания на отсутствие внутренних противоречий. Поэтому на практике условия работы элементов управления автоматическим циклом обычно задают в форме циклограмм включений и циклограмм движений, а также в форме специальных таблиц, что было уже описано выше.

Словесному заданию условий срабатывания управляющих элементов соответствуют следующие булевы соотношения:

$$Y_1 = X_{10} \& \bar{X}_{20} \& X_{35} \& \bar{Y}_3;$$

$$Y_2 = Y_1 \& \bar{X}_{20} \& X_{40};$$

$$Y_3 = Y_2 \& \bar{X}_{20} \& X_{45}.$$

Заметим еще раз, что сигналы на входах ПЛК от путевых выключателей X_{35} , X_{40} и X_{45} , расположенных соответственно на исходной, промежуточной и конечной позициях, являются импульсными, тогда как сигналы Y_1 , Y_2 и Y_3 , вызывающие соответственно движение силовых головок вперед на быстром ходу, вперед на рабочей подаче и возврат на быстром ходу, являются потенциальными.

§ 16.3. Локальные сети из программируемых командоконтроллеров

Современные ПЛК кроме описанных выше логических функций, минимально необходимых для выполнения автоматических циклов, в ряде случаев выполняют развитые функции, позволяющие осуществлять арифметические операции и обработку текстов, а также снабжены устройствами внешней памяти и различными устройствами печати для документирования рабочего процесса.

Для управления сложными объектами с помощью ПЛК обычно используются универсальные локальные вычислительные сети. Под *локальной сетью* понимают высоконадежную высокоскоростную систему передачи данных, которая обеспечивает взаимосвязь различных устройств обработки информации и управления равноправным или подчиненным способом либо комбинацией обоих способов в пределах определенной ограниченной площади. Главной задачей таких сетей является не только и не столько децентрализованное размещение ПЛК непосредственно в зоне управляемого объекта, сколько разделение функций управления, контроля и диагностирования на ряд слабо связанных между собой функций и распределение их между несколькими устройствами. Это позволяет осуществлять так называемое делегирование функций, что повышает пропускную способность и живучесть системы управления, увеличивает гибкость ее структуры и позволяет на этапе эксплуатации наращивать управляющие мощности.

С функциональной точки зрения локальные сети представляют собой каналы различной конфигурации с ветвями и узлами. Узлами таких сетей могут быть ПЛК, а также и другие устройства информационной технологии, например персональные компьютеры, устройства ЧПУ, микропроцессорные комплекты и др. Локальная сеть обеспечивает информационное объединение таких достаточно разнородных компонентов.

Локальную сеть определяют четыре основные характеристики:

- базовые средства для реализации передачи информации;
- структура сети;
- методы передачи информационных сигналов;

- методы адресации и выборки информационных сигналов.

Базовые средства представляют собой физическую реализацию канала передачи информации, используемого для взаимосвязи узлов сети. Их подразделяют на ограниченные, к которым относятся витая пара проводов (бифилярная обмотка), коаксиальный кабель, оптоволоконный кабель, и на неограниченные, к которым относятся радио- и микроволновые каналы, каналы для передачи инфракрасных и других подобных сигналов.

Сравнительные характеристики ограниченных базовых средств построения локальных сетей приведены в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Сравнительные характеристики ограниченных средств локальных сетей

Базовые средства	Полоса пропускемых частот, МГц	Скорость обработки данных, Мбит/с	Создаваемый уровень помех
Бифилярная обмотка	1	1	Высокий
Коаксиальный кабель	40...300	10...12	Низкий
Оптоволоконный кабель	$33 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	Очень низкий

Применение волоконной оптики в локальных сетях систем обработки информации затруднено прежде всего из-за отсутствия достаточно надежных разъемов и разветвителей. Вместе с тем использование волоконной оптики является весьма перспективным. На данном этапе оптимальным базовым средством считается коаксиальный кабель.

Что касается *структуры* локальных сетей, то применяются три ее основных типа: *звезда*, *кольцо* и *магистраль*, что показано на рис. 16.4.

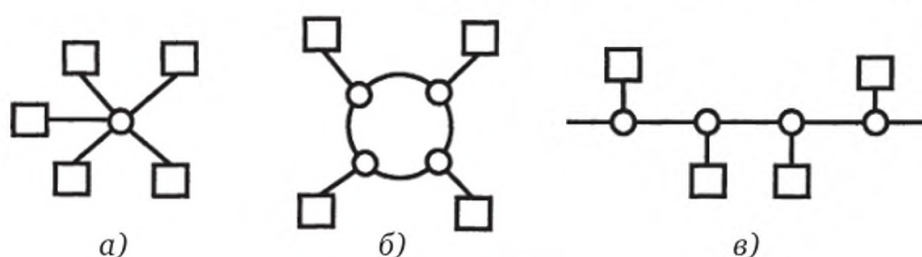


Рис. 16.4. Типы структур локальных сетей

Структура типа звезды, приведенная на рис. 16.4, а, характеризуется централизованной схемой передачи информации. Суммарная длина соединительных кабелей здесь наибольшая по сравнению с другими видами структур. Отказ центрального процессора выводит из работы всю локальную сеть.

Кольцевая структура, приведенная на рис. 16.4, б, характеризуется распределенной схемой передачи информации, но также приводит к значительному расходу соединительного кабеля и к тому же имеет

ограниченную возможность к расширению. Отказ центрального процессора здесь также может вывести из работы всю сеть, если только не предусмотреть обходные цепи.

Магистральная структура, приведенная на рис. 16.4, в, также является распределенной. Она характеризуется усложненной схемой передачи информации и требует наличия устройств, идентифицирующих сообщения и управляющих их приемом и передачей. Но при такой структуре затраты соединительного кабеля оказываются наименьшими, она оказывается удобной для расширения. Выход из строя какого-либо узла не приводит к потере работоспособности всей системы, что является весьма важным эксплуатационным удобством.

Возможны и применяются также различные комбинации описанных структур. Так, в многоуровневых системах управления и мониторинга локальные устройства управления группами станков циклического действия обычно подключаются к устройствам, являющимся концентраторами данных, по схеме звезды, тогда как сами эти концентраторы данных и локальные (бортовые) устройства управления транспортными устройствами (например, робототележками) подключаются к центральному процессору по магистральной схеме.

Что касается *метода передачи информационных сигналов*, то в локальных сетях в основном используются два метода передачи этих сигналов, называемые *базовым* и *многополосным*. При использовании базового метода информационные сигналы остаются в первоначальном, немодулированном виде, и одному каналу соответствует одна жила кабеля. При многополосной передаче один физический канал делится на несколько независимых частотных каналов, каждый из которых используется для передачи своих информационных сигналов.

Адресация и выборка сигналов в локальных сетях может быть реализована различными способами, но наибольшее распространение получили два: с использованием опознавательных меток (идентификаторов) и с параллельным доступом к различным несущим частотам и использованием совпадений. В соответствии с первым из двух названных способов адресуемый пакет информации, который может содержать несколько байтов, должен также обязательно иметь определенный кодовый набор (метку), вместе с которым он перемещается от узла к узлу. Наличие такой же метки в том или ином узле предоставляет именно ему доступ к информации, содержащейся в данном пакете, тогда как узлы, не содержащие этой метки, оказываются лишенными такого доступа.

Применение общих принципов компоновки структур из разнородных устройств вызывает необходимость стандартизации связей между устройствами. Характерным примером стандартов, регламентирующих обмен информацией между устройствами, объединенными в локальные сети, является разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO) стандарт ISO — OSI.

В соответствии с этим стандартом процедура обмена информационными данными стандартизуется по семи уровням. Эти уровни стандартизации, начиная с самого низкого, таковы:

- физический уровень, определяющий электрические, механические и функциональные характеристики схем обмена информацией;
- уровень канала передачи данных, на котором устанавливается, поддерживается и блокируется канал передачи информации и контрольных сигналов;
- уровень коммуникации, на котором назначается тактность, осуществляются переключение, сегментация, блокирование и контроль передаваемых массивов, а также восстановление ошибочно переданных сигналов;
- уровень передачи, на котором осуществляются передача данных, непрерывный контроль и мультиплексирование;
- уровень сеансов связи, на котором осуществляются диспетчирование и контроль сеансов обмена информацией между двумя объектами;
- уровень воспроизведения, на котором происходят интерпретация данных, преобразование форматов и кодов;
- уровень применения, на котором осуществляется использование принятых данных.

Практически в настоящее время существуют и могут быть приобретены и использованы при компоновке локальных сетей, отвечающих конкретным задачам потребителей, различные типовые сетевые средства, способные объединять в единое целое разнородные устройства, такие, например, как ПЛК различных типов и размеров, устройства ЧПУ, табло, пульта управления, локальные специализированные управляющие устройства и т. д.

Таким образом, локальные сети образуют универсальные коммуникационные структуры, которые вместе с необходимой номенклатурой локальных устройств обработки информации и соответствующих интерфейсов дают возможность гибко компоновать комплексы технических средств (КТС, в англоязычной технической литературе «Hardware») для обработки информации и ее использования для целей индикации и автоматизации.

§ 16.4. Мониторинг оборудования с автоматическим циклом

Обследования показывают, что фактическая производительность ряда автоматических линий часто оказывается ниже проектной. Рациональная организация эксплуатации автоматических линий может оказаться весьма эффективной для устранения этого недостатка. В таком случае, как говорят, осуществляется наблюдение за работой (мониторинг) автоматической линии. Управление самой работой автоматической линии осуществляется одним из известных способов, например

релейно-контактным устройством или программируемым логическим контроллером. Мониторинг осуществляется специальной системой. Эта система называется также автоматизированной системой управления эксплуатацией автоматической линии. Она реализуется различными средствами, в том числе с использованием ПЛК, или универсальных компьютеров, или компьютерных сетей.

Структура функций системы мониторинга работы автоматической линии приведена на рис. 16.5.

Эта система должна обеспечивать поддержание работоспособности комплекса оборудования автоматической линии в течение всего срока ее службы, т. е. предотвращать или сводить к минимуму простой оборудования.

Для этого необходимо:

- устранять отказы комплекса оборудования своевременной заменой или восстановлением отдельных элементов (деталей, блоков, узлов, агрегатов), что является функцией системы ремонта;
- своевременно выявлять и предупреждать неисправности, повышать долговечность оборудования путем уменьшения интенсивности его износа и проведения диагностических проверок, а также снабжать линию соответствующими и качественными заготовками, оснасткой, маслами, смазывающе-охлаждающими жидкостями и т. д., что определяет задачи системы обслуживания.

Система мониторинга работы такого сложного объекта циклического действия, каким является автоматическая линия, решает следующие задачи:

- количественный учет движения единиц продукции по технологическим и транспортным операциям, по складам и по постам ОТК;
- выдача информации по рабочим местам для проверки соответствия фактического и запланированного хода производства;
- определение необходимости производства переналадок или подналадок в связи с окончанием обработки партии деталей или в связи с аварийным отставанием фактического выпуска деталей от запланированного;
- определение очередности запуска в обработку партий деталей;
- определение размера партии при запуске в обработку детали очередного наименования;
- определение приоритетов в снабжении и обслуживании рабочих мест;
- определение необходимости привлечения руководителей и других лиц, принимающих решения (ЛПР), для использования имеющихся резервов производства;
- определение необходимости и момента начала регламентных работ по контролю оборудования, смене инструмента и т. д.;
- вызов персонала служб обслуживания (электриков, электроников, гидравликов, ремонтников-механиков и др.) на рабочие места и осуществление оперативной связи с ними и руководства ими;

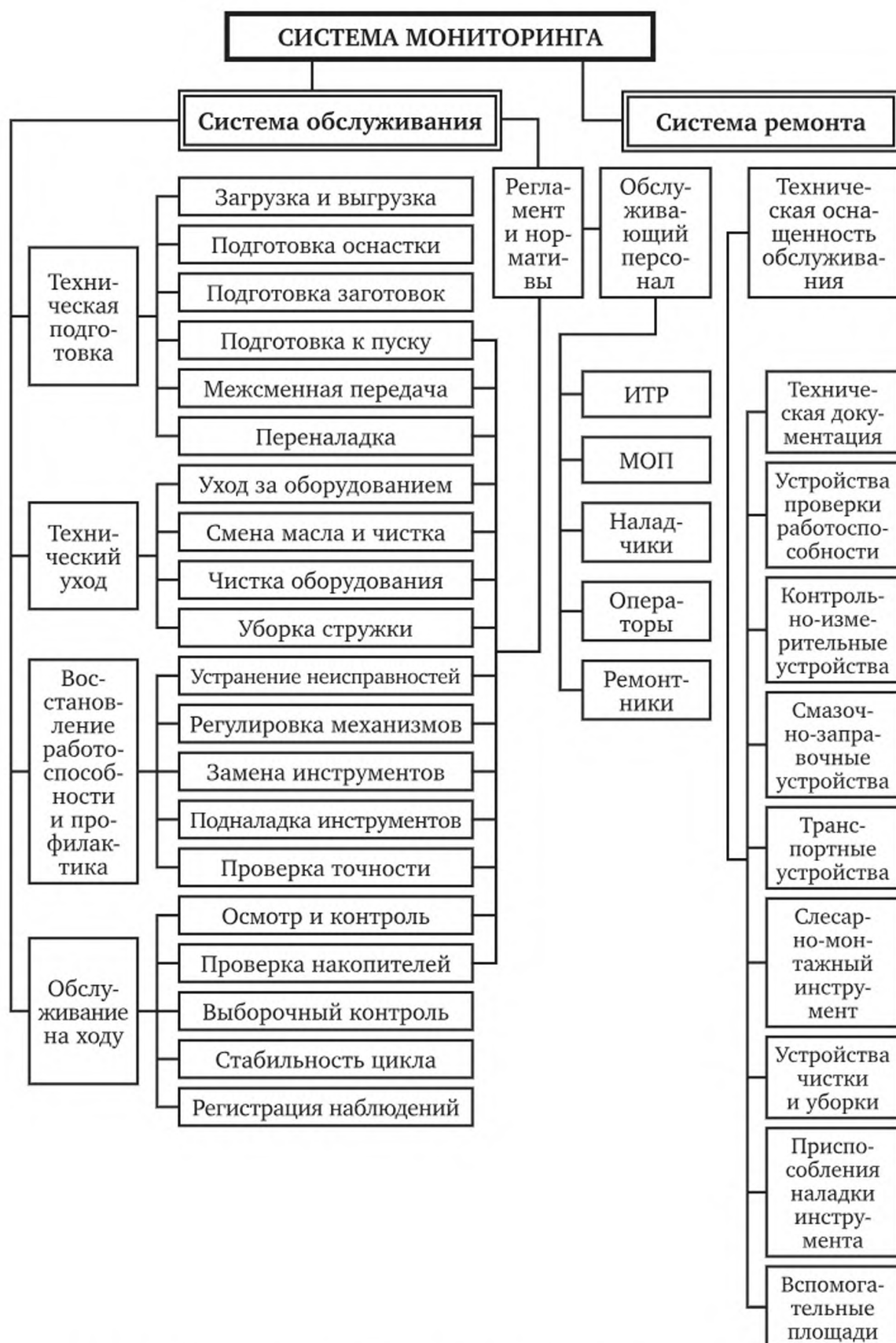


Рис. 16.5. Структура функций системы мониторинга комплекса автоматического оборудования

- передача и регистрация запросов и распоряжений;
- проверка наличия средств обеспечения и уровня запасов на складах;

- осуществление оперативной связи с обслуживающим персоналом и с персоналом складов.

Автоматическое решение этих многочисленных задач основано на сравнении фактических данных по ходу производственного процесса с нормативами, определении их отклонений, оценке этих отклонений и принятии соответствующих управляющих решений. Отклонения от внутрисменного графика производства обычно индицируются непосредственно на рабочих местах, где автоматизируется первичный учет путем установки датчиков, работающих на локальные счетчики.

Организация рациональной эксплуатации комплекса автоматического оборудования на основе мониторинга сводится к осуществлению связей, координирующих управление материальными и информационными потоками, причем каждый из этих потоков должен иметь свою качественную и количественную характеристики.

Условия ведения производства на комплексе автоматического оборудования и учет влияния окружающей среды (отказы и изменения в состоянии оборудования, изменение материальных потоков по качеству и количеству и т. д.) являются вероятностными. Поэтому для управления работой такого комплекса оборудования необходимо также организовать информационные потоки, отражающие количественные характеристики рабочих параметров всего производственного процесса и текущего обслуживания. Подобные информационные потоки должны также содержать данные, например, о температуре воздуха в цехе, поскольку ее повышение приводит к нарушениям работы гидравлических и смазочных систем, повышенному нагреву эталонов измерительных устройств и т. д. Источниками этой информации являются датчики, установленные на оборудовании, а также датчики состояния окружающей среды.

В качестве датчиков состояния оборудования могут быть использованы элементы управления работой и осуществления элементов рабочего цикла оборудования, а именно различного рода концевые выключатели, органы оперативного управления, блок-контакты пускателей электродвигателей и др.

Вся информация, вырабатываемая системой мониторинга, делится на три группы:

- периодическая информация, выдаваемая на печать или визуализируемая каким-либо другим способом в заранее установленные периоды времени, например в конце каждой смены; эта информация составляется не только на основании показаний датчиков, но и на основании устройств ручного ввода данных по отчетам службы механика, электрика, бюро инструментального хозяйства и др.;
- оперативная информация (например, сигнализация о факте возникновения отказа и о месте его возникновения), выдаваемая на печать или визуализируемая каким-либо другим способом по мере ее выработки, а не в заранее установленные моменты времени; места визуализации оперативной информации (табло, дисплеи и др.) должны

быть максимально приближены к тому оборудованию, которое является источником подобной информации;

- информация, поступающая по требованию, а не в заранее установленные моменты времени и независимо от факта ее изменения, например справка о браке или о числе произведенных годных деталей того или иного наименования.

Для осуществления эффективного мониторинга в информации, выдаваемой соответствующей системой, должны содержаться следующие сведения:

- о производительности всего комплекса оборудования и его отдельных единиц;
- об уровне имеющихся запасов по заготовкам, полуфабрикатам и готовым изделиям;
- о величине межоперационных заделов в промежуточных емкостях и в транспортных устройствах;
- о фонде времени работы и простоев оборудования, включая данные о календарном и рабочем времени отдельных единиц оборудования, времени их простоя и коэффициенте использования;
- о длительности цикла работы оборудования и о выполнении отдельных элементов цикла с фиксацией и анализом отклонений от нормы;
- об отказах с дифференциацией простоев отдельных единиц оборудования, причем указываются следующие возможные состояния отдельных элементов: элемент работает, элемент не включился, элемент не отключился, короткое замыкание элемента на землю, время работы элемента отклоняется от нормы (завышено или занижено);
- о наладке оборудования, например время, затраченное на наладку оборудования;
- об объеме годной продукции и брака, о подсчете заготовок, о подсчете годных деталей того или иного качества, о подсчете бракованных деталей применительно к видам дефектов;
- о техническом состоянии оборудования, включая отклонения от норм нагрева отдельных компонентов, например подшипниковых узлов, масла в гидросистеме и в системе смазки, о давлении, вибрациях и т. д.;
- о фактическом состоянии режущего и вспомогательного инструмента и о необходимости его замены;
- о ресурсе (заданном, израсходованном и оставшемся) режущего и вспомогательного инструмента и о моментах принудительной замены того или иного инструмента.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные недостатки традиционных релейно-контактных схем?
2. Каковы основные недостатки прямой замены элементов традиционных релейно-контактных схем бесконтактными элементами?

3. Что называется архитектурой цифрового программируемого устройства?
4. Каковы особенности архитектуры программируемых командоконтроллеров в части длины разрядной сетки?
5. Каковы особенности архитектуры программируемых командоконтроллеров в части системы команд?
6. Каковы особенности архитектуры программируемых командоконтроллеров в части входного языка программирования?
7. Каковы особенности архитектуры программируемых командоконтроллеров в части входных и выходных устройств?
8. Какие устройства объекта управления могут служить источниками сигналов для программируемого командоконтроллера?
9. На какие устройства объекта управления могут поступать выходные сигналы программируемого командоконтроллера?
10. В чем состоит проблема «серийности и номенклатуры»?
11. В чем состоит агрегатно-модульный принцип применительно к входным и выходным устройствам программируемых командоконтроллеров?
12. На какие типоразмеры разделяются программируемые командоконтроллеры?
13. В чем состоит процедура коммутационной привязки программируемого командоконтроллера к конкретному объекту?
14. В чем состоит процедура программной привязки программируемого командоконтроллера к конкретному объекту?
15. В чем состоит процедура физической привязки программируемого командоконтроллера к конкретному объекту?
16. В каком режиме осуществляется правильность привязки программируемого командоконтроллера к конкретному объекту?
17. Что ограничивает задание условий составления программы работы программируемого командоконтроллера в словесной форме?
18. Как программа работы программируемого командоконтроллера записывается в виде булевых соотношений?
19. Что называется локальной сетью передачи информации?
20. С какой целью строят локальные сети из программируемых командоконтроллеров?
21. Что является базовыми средствами для построения локальных сетей?
22. Что относится к ограниченным и что — к неограниченным базовым средствам построения локальных сетей?
23. Каковы основные свойства структурной схемы построения локальных сетей по принципу «звезды»?
24. Каковы основные свойства структурной схемы построения локальных сетей по принципу «кольца»?
25. Каковы основные свойства структурной схемы построения локальных сетей по принципу «магистрали»?
26. В чем заключается базовый метод передачи информации в локальных сетях?
27. В чем заключается многополосный метод передачи информации в локальных сетях?
28. В чем заключается метод адресации и выборки информации в локальных сетях с помощью опознавательных меток-идентификаторов?
29. В чем заключается метод адресации и выборки информации в локальных сетях с параллельным доступом к несущим частотам и использованием совпадений?
30. На сколько уровней и на какие именно уровни стандартизуется процедура обмена информацией в локальных сетях?

31. Что такое мониторинг оборудования с автоматическим циклом?
32. Что необходимо для поддержания работоспособности автоматического оборудования во время всего срока его службы?
33. Какие отдельные задачи решаются при проведении мониторинга оборудования с автоматическим циклом?
34. Что входит в задачи системы обслуживания комплекса автоматического оборудования циклического действия?
35. Что входит в задачи системы ремонта комплекса автоматического оборудования циклического действия?
36. Что включается в задачи технической подготовки производства на комплексе автоматического оборудования циклического действия?
37. Что включается в задачи технического ухода за комплексом автоматического оборудования циклического действия?
38. Что включается в задачи восстановления работоспособности и профилактики комплекса автоматического оборудования циклического действия?
39. Что включается в задачи обслуживания на ходу комплекса автоматического оборудования циклического действия?
40. На какие группы делится вся информация, выдаваемая системой мониторинга комплекса автоматического оборудования циклического действия?
41. Что должна содержать информация, выдаваемая системой мониторинга комплекса автоматического оборудования циклического действия?

Глава 17

ЧИСЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТАНКАМИ

§ 17.1. Общая структура системы числового программного управления (ЧПУ) механообрабатывающим станком

Системы числового программного управления станками (ЧПУ) представляют собой наиболее динамично развивающуюся группу систем управления технологическим оборудованием, которая приобрела в последнее время превалирующее значение и практически вытесняет все другие типы систем автоматического управления в машиностроении. Особенностью этого вида автоматического оборудования является задание программы обработки конкретной детали в виде набора чисел, определяющих как контур детали, так и траектории движений исполнительных органов станка, содержащих режущие инструменты, относительно заготовки, выбор инструментов и технологических режимов, а также порядка функционирования самой системы числового управления.

Управляющая программа представляет собой совокупность текстов, записанных соответствующими унифицированными кодами. Она разбивается на ряд неделимых совокупностей записей, называемых кадрами. Кадр управляющей программы представляет собой совокупность записей (текстов), однозначно определяющих поведение и параметры этого поведения для всего станка в период между двумя какими-либо изменениями, пусть даже минимальными. Следует различать понятия «длина записей, составляющих кадр» и «время отработки данного кадра». Кадр, имеющий полную длину записи, например движение снятия фаски резцом, может отрабатываться на станке за очень короткое время. Другой же кадр, например фрезерование плоскости и снятие нескольких слоев припуска, может иметь такую же длину записи, но фактически отрабатываться на станке за длительное время.

Вся информация, входящая в состав кадра, делится на три группы: *геометрическая* информация, определяющая геометрические параметры программируемых координатных движений, *технологическая*, определяющая такие параметры этих движений, как скорость враще-

ния шпинделя, номер выбираемого инструмента (для многоинструментных станков), величины координатных подач и др., а также *вспомогательная информация*, устанавливающая режимы работы системы управления станком.

По технологическому назначению и по функциональным возможностям системы ЧПУ делят на следующие группы.

- *позиционные системы*, в которых имеют значение только координаты конечных точек положения исполнительных органов данной единицы оборудования, достигаемых этими органами после окончания ими характерных элементов рабочего цикла, независимо от того, по какой траектории указанные исполнительные органы двигались к заданным точкам;
- *контурные, или непрерывные, системы*, в которых осуществляется управление движением исполнительного органа по заданной криволинейной траектории;
- *универсальные (комбинированные) системы*, в которых осуществляется управление (и соответственно программирование) как конечными перемещениями при позиционировании, так и траекториями движения исполнительных органов, а также процессами смены инструмента и загрузки-выгрузки заготовок.

К системам ЧПУ первой группы относятся сверлильные, расточные и координатно-расточные станки, дыропробивные прессы, установки для точечной сварки и т. п.

К системам ЧПУ второй группы относятся различные токарные, фрезерные и шлифовальные станки и т. п.

К системам ЧПУ третьей группы относятся различные многоцелевые и многоинструментные токарные и сверлильно-фрезерно-расточные станки, называемые также *обрабатывающими центрами*. Сюда же относятся и все более широко применяемые станки, называемые *блок-центры*, или *агрегат-центры*, у которых по программе осуществляется не только поиск и смена отдельных инструментов или инструментальных комплектов, но также поиск и смена многошпиндельных силовых головок, находящихся в специальном магазине. В станках такого типа сочетается высокая производительность агрегатных станков с известной степенью гибкости.

По способу подготовки и ввода управляющей программы (УП) системы ЧПУ делят на оперативные системы, у которых УП готовится непосредственно на станке в процессе обработки первой детали из партии или имитации ее обработки, и системы, для которых УП готовится независимо от обработки детали. При этом независимая подготовка УП может выполняться либо с помощью средств вычислительной техники, входящих в состав системы ЧПУ данного станка, не мешая ведущейся при этом обработке, либо вне данной системы ЧПУ с помощью той или иной системы автоматизации программирования.

Общая структура функциональных блоков системы ЧПУ как автомата, выполняющего обработку цифровыми методами информации, заданной в цифровой (числовой) форме, приведена на рис. 17.1.

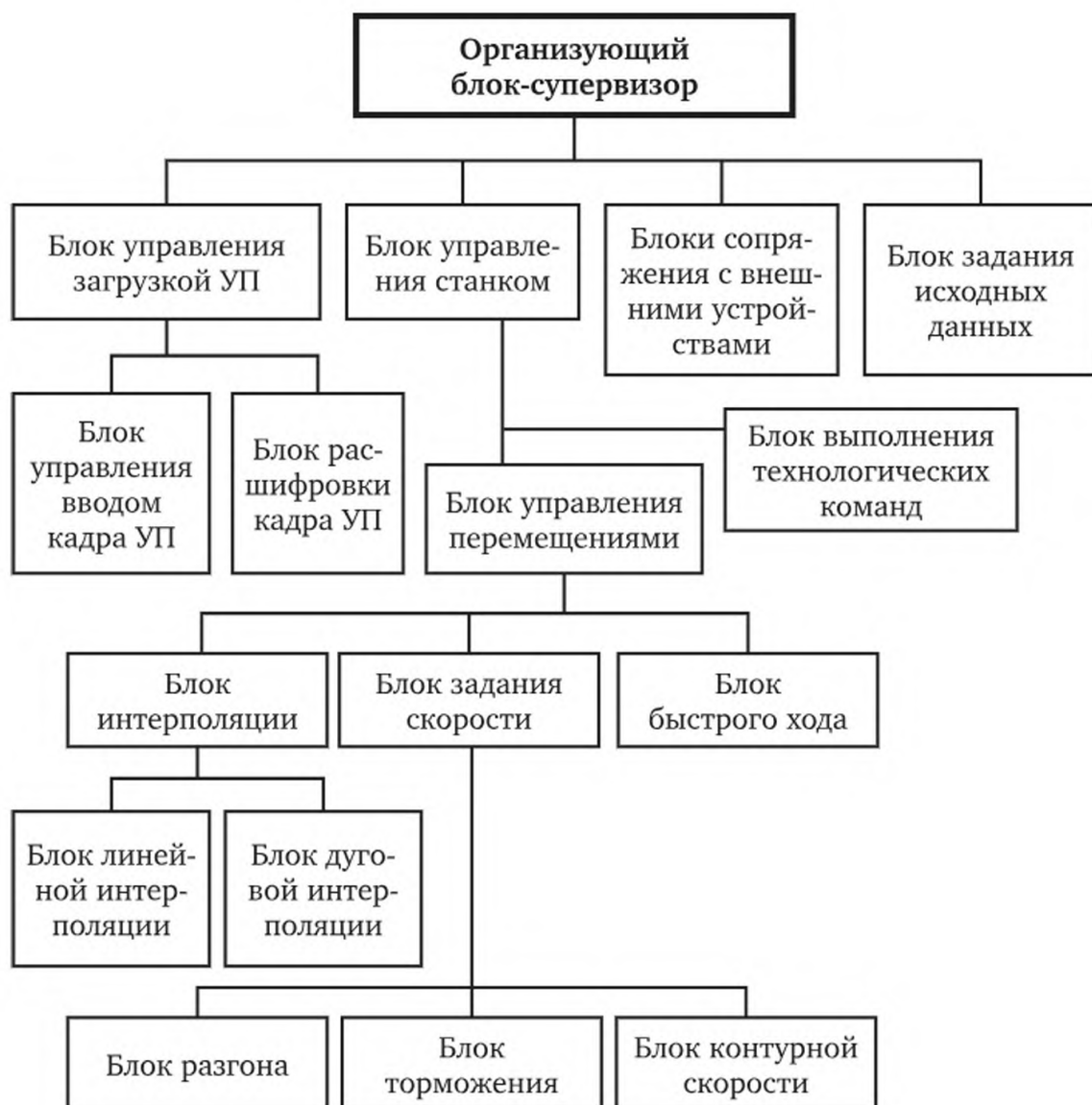


Рис. 17.1. Общая структура функциональных блоков системы ЧПУ

Отметим, что указанные на рис. 17.1 функциональные блоки могут быть реализованы различными способами как с помощью жестко спроектированных неизменяемых цифровых схем (так называемых схемных автоматов), так и с помощью программируемых средств вычислительной техники. Само программирование средств вычислительной техники для решения задач числового программного управления может осуществляться различными способами.

Одним предельным случаем является использование универсального компьютера (обычно помещаемого в корпус, приспособленный для работы в цеховых условиях), в который заносится программа выполнения функций блоков числового программного управления. Обычно это делается на этапе проектирования системы ЧПУ. В этом случае при составлении программы ЧПУ для универсального компьютера нужно учитывать его архитектуру и постоянное для всех пользователей программное обеспечение этого компьютера (например, операционные системы и трансляторы).

Другим предельным случаем является программирование отдельных микропроцессоров на выполнение тех или иных конкретных функций ЧПУ с последующим объединением этих запрограммированных блоков в единое устройство ЧПУ. В этом случае архитектура устройства ЧПУ разрабатывается с учетом программы, которую оно должно выполнять.

Так или иначе в устройство ЧПУ должны входить функциональные блоки, соответствующие структуре, показанной на рис. 17.1, независимо от того, реализованы они в виде программных блоков в универсальном компьютере, либо в виде запрограммированных микропроцессоров, либо в виде схемных цифровых узлов.

Рассмотрим эти функциональные блоки подробнее.

Организирующий блок-супервизор осуществляет включение — передачу управления тем или иным функциональным блоком из числа изображенных на рис. 17.1, но сам никакой конкретной функции не выполняет. Можно сказать, что его единственной функцией является анализ ситуации, определяемой сигналами, поступающими от датчиков состояния рабочих органов станка, и командами управляющей программы, и включение того или иного функционального блока, который будет выполнять конкретную работу, необходимую для этой ситуации в соответствии со своей специализацией.

Программа управления загрузкой начинает свою работу по указанию программы-диспетчера. Она осуществляет ввод и расшифровку кадра управляющей программы. В расшифрованном массиве кадра должна содержаться следующая информация, необходимая для работы подпрограмм управления станком:

- признаки направления перемещений по координатным осям;
- значение величины подачи по координатным осям;
- признаки разгона и торможения;
- признаки быстрого хода;
- константы интерполяции;
- признак, определяющий направление обхода обрабатываемой окружности;
- координаты начальных и конечных точек для обрабатываемых отрезков;
- значение скорости главного движения;
- содержимое технологических и вспомогательных команд и др.

При отсутствии в кадре технологических команд, означающих гашение перемещений, а также при отсутствии признака «быстрый ход» производится передача управления блоку интерполяции. Блок интерполяции предназначен для формирования координат промежуточных положений, возникающих после каждого дискретного перемещения исполнительного органа по тем или иным координатным осям, с целью образования результирующей линейной или дуговой траектории движения инструмента. Такое формирование производится на основании заданных значений координат некоторых опорных точек и закона перемещения относительно этих опорных точек. Например, могут быть

заданы закон линейного перемещения между двумя точками и координаты этих конечных точек. Процесс формирования таких промежуточных координат, т. е. определение направления следующего дискретного шага по координатным осям после выполнения предыдущего дискретного шага, и составляет существо процесса интерполяции, что будет более подробно рассмотрено далее.

Величина подачи также задается в обрабатываемом кадре. Для снижения динамических нагрузок на привод и уменьшения динамических погрешностей, связанных с резким изменением скорости, в кадре управляющей программы предусматриваются признаки разгона и торможения.

В случае разгона проверяется, не превышает ли заданное приращение скорости $V_{\text{зад}}$ допустимую величину, и если оказывается, что превышает, то назначаются максимально допустимая величина «наброса» скорости ΔV (высота «ступеньки» при ступенчатом приближении к заданной скорости) и время Δt «выстоя» на этой скорости (ширина «ступеньки» при ступенчатом приближении к заданной скорости). Это показано на рис. 17.2.

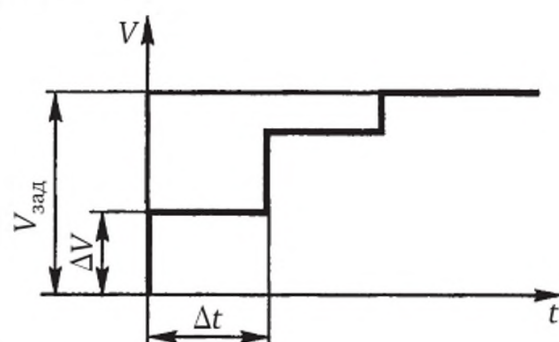


Рис. 17.2. Схема ступенчатого «наброса» скорости при разгоне

В случае торможения при приближении к заданной точке определяется момент перехода на «ползучую» подачу, обеспечивающую достижение заданной точности, а затем скорость исполнительного органа ступенчато снижается до этой «ползучей» скорости.

В функции блока задания скорости входит также «загрубление» цены одного импульса при наличии в кадре управляющей программы признака быстрого хода. Такое изменение дискретности привода может быть достигнуто различными переключениями в схеме управления приводом, например в случае использования в данном приводе шагового двигателя, путем переключения тактности в схеме управления этим двигателем.

Как и в случае копировальных станков, из технологических соображений при обработке контуров различного профиля должно поддерживаться постоянство контурной скорости, т. е. скорости, направленной по касательной к контуру. Угол же подъема контура, т. е. соотношение между приращениями кривой профиля контура по осям координат, может быть различным. Поэтому различной должна быть и величина

задающей подачи, что осуществляется с помощью соответствующего пересчета.

Другие функциональные блоки, принципиально несложные, такие как блоки, выполняющие стандартные операции ввода и вывода данных для индикации и для восприятия команд от специальных органов управления, могут оказаться весьма разнообразными в зависимости от состава и типа используемых средств вычислительной техники, автоматизируемого станка, состава пульта управления и индикации, типа используемых приводов и т. д.

§ 17.2. Рабочие режимы в механообрабатывающих станках с ЧПУ

Для систем ЧПУ, использующих средства вычислительной техники и гибко осуществляющих автоматическое управление технологическим оборудованием, характерны следующие режимы:

- *режим ввода информации*, когда осуществляется ввод управляющей программы или исходных данных для нее вручную, от внешнего носителя или через канал дистанционной связи, синтаксический и грамматический анализ вводимой информации, вывод и индизирование ошибок, размещение вводимой информации в памяти системы;
- *автоматический рабочий режим*, при котором осуществляется обработка детали в соответствии с управляющей программой, автоматическое регулирование подачи, ускоренная отработка управляющей программы, накопление эксплуатационной информации, в том числе счет деталей, заготовок, учет брака, регистрация времени обработки и др.;
- *режим вмешательства оператора* в процесс автоматического управления, при котором выполняются операции технологической остановки, т. е. прерывания обработки в ситуации, заранее предусмотренной технологом — составителем программы обработки, пропуск кадров программы и их отработка без выдачи управляющих команд, зеркальное отражение участков траектории и масштабирование отдельно по координатам, а также коррекция технологических режимов, кодов инструментов и кодов приспособлений спутников и др.;
- *ручной режим*, при котором реализуются настройка станка и ручное управление перемещениями, отладка управляющей программы, отработка перемещений инструмента при задании скорости перемещений вручную, набор и отработка кадров программы, их запоминание и хранение, формирование программы в целом из отдельных кадров, визуализация кадров и их отдельных фраз, ввод различных видов коррекции, диагностирование механизмов станка, инструмента, системы автоматического управления и др.;
- *режим редактирования*, заключающийся в поиске нужного кадра программы и выводе его на устройство индикации, коррекции кадров, их замене, вставке и удалении и внесении различного рода поправок;

- *режим вывода информации*, когда составленная управляющая программа выводится на те или иные внешние устройства: перфоратор, печатающее устройство (принтер), компакт-кассету, во внешнюю память, на устройство записи на неразрушаемый носитель, например на компакт-диск, а также в канал связи с другим компьютером и/или в локальную сеть;

- *режим вычислений*, когда осуществляется расчет требуемых величин по заданным формулам, например, режимов резания или параметров геометрических преобразований, формирование управляющей программы на основе входной информации, представленной в сжатом виде, формирование геометрических моделей и др.;

- *дисплейный режим*, когда выполняются выделение и визуализация информации, ведение диалога, декодирование сообщений системы, включая преобразование информации, представленной в машинном виде, в «открытый текст», использование «меню», визуализация двух- и трехмерных графических объектов и управление их перемещением в пространстве и др.;

- *режим диагностирования*, в процессе которого формируются аварийные и диагностические предупреждения.

Особо следует рассмотреть работу блока интерполяции. Интерполяционные расчеты выполняются на высокой скорости, характерной для устройств вычислительной техники, во время пауз между осуществлением механических движений. Цель этих расчетов состоит в том, чтобы, учитывая требуемую траекторию движения исполнительного органа и его фактическое положение, достигнутое в результате предыдущего шага, определить направление движения на следующем шаге еще до того, как он будет фактически осуществлен.

Интерполяция может выполняться различными методами. Рассмотрим интерполяцию по методу оценочной функции как наиболее универсальный и наиболее широко применяемый метод. Различают *линейную* и *дуговую (круговую)* интерполяции по методу оценочной функции.

При *линейной* интерполяции отрезки прямой линии, в общем случае непараллельные осям координат, аппроксимируются ломаной линией, отрезки которой равны между собой и соответствуют цене одного элементарного шага по координатным осям, причем эти отрезки параллельны координатным осям.

На рис. 17.3 изображен процесс линейной интерполяции, т. е. поиска направления следующего шага с целью аппроксимации с минимальными отклонениями отрезка прямой линии OK после того, как в результате предыдущего шага исполнительный орган оказался в точке $M(z_j, x_j)$. Для простоты будем считать, что начало O аппроксимируемого отрезка прямой OK совмещено с началом координат.

Разность угловых коэффициентов отрезков OK и OM обозначим $F_{ij}^* = x_i/z_j - x_K/z_K$, или, с точностью до положительного множителя $z_j z_K$, отбрасывание которого не изменит знака F_{ij}^* , примем $F_{ij} = x_i z_K - x_K z_j$.

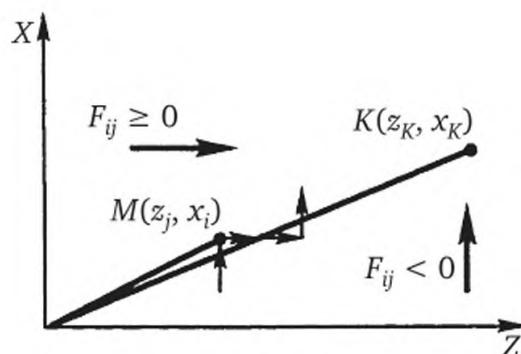


Рис. 17.3. Схема линейной интерполяции по методу оценочной функции

Величина F_{ij} называется *оценочной функцией*. Она может быть положительной или отрицательной в зависимости от того, по какую сторону от прямой OK лежит текущая точка M .

Из рис. 17.3 видно, что если $F_{ij} \geq 0$, то для приближения к заданному отрезку OK следующий шаг надо совершить по оси Z , а если $F_{ij} < 0$ — то по оси X . После шага по оси X новое значение текущей координаты (для I квадранта) определяется выражением $x_{i+1} = x_i + 1$, а новое значение оценочной функции $F_{i+1,j}$ определится из соотношения $F_{i+1,j} = (x_i + 1)z_K - x_K z_j = F_{ij} + z_K$. После шага по оси Z новое значение текущей координаты будет $z_{j+1} = z_j + 1$, а новое значение оценочной функции будет равняться $F_{i,j+1} = x_i z_K - x_K (z_{j+1}) = F_{ij} - x_K$. Начальное значение оценочной функции равно нулю.

Затем этот процесс повторяется, пока с точностью до цены шага интерполяции не будет достигнута точка K . Величины x_K и z_K называются константами линейной интерполяции.

При дуговой (круговой) интерполяции ломаной линией аппроксимируются участки дугового контура, как это изображено на рис. 17.4. Дуга окружности может быть геометрически однозначно задана разными способами. Для определенности будем считать, что дуга окружности задана такими параметрами, как координаты начальной и конечной точек интерполируемой дуги, координатами центра O этой дуги, а также признаком направления движений по этой дуге. В нашем случае движение осуществляется в I квадранте против часовой стрелки и центр дуги помещен в начало координат. Методика интерполяции легко обобщается на случай движения в остальных квадрантах и против часовой стрелки.

Расстояние (радиус-вектор) от начала координат до текущей точки траектории с координатами x_i и z_j определяется соотношением

$$R_{ij} = (x_i^2 + z_j^2)^{1/2}.$$

Оценочная функция определяется знаком разности квадратов текущей длины радиуса-вектора R_{ij} фактической траектории и заданного значения радиуса дуги R , т. е.

$$F_{ij} = x_i^2 + z_j^2 - R^2.$$

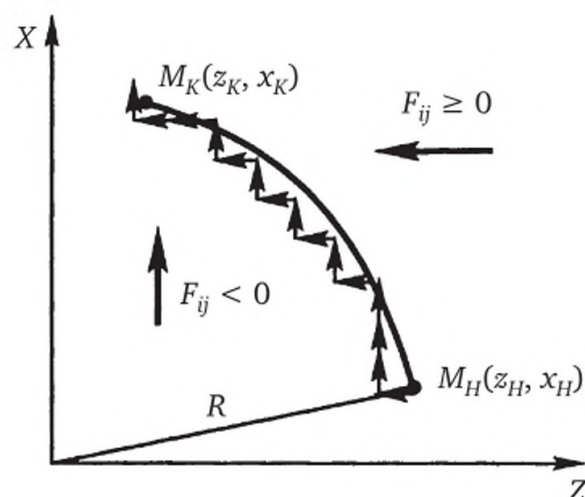


Рис. 17.4. Схема дуговой интерполяции по методу оценочной функции

Как видно из рис. 17.4, дуга окружности радиуса R делит плоскость квадранта, в которой она расположена, на две области. Область, в которой $F_{ij} < 0$, находится внутри дуги, область, где $F_{ij} > 0$, — вне дуги, а на самой дуге $F_{ij} = 0$. Таким образом, если $F_{ij} \geq 0$, то шаг делается в отрицательном направлении оси Z ; если $F_{ij} < 0$, то шаг делается в положительном направлении оси X . Начальное значение оценочной функции равно нулю.

При шаге по оси Z получаем $z_{j+1} = z_j - 1$, а оценочная функция в таком случае равна

$$F_{i,j+1} = x_i^2 + (z_j - 1)^2 - R^2 = F_{ij} + (-2z_j + 1).$$

При шаге по оси X получаем $x_{j+1} = x_j + 1$. Оценочная функция при этом

$$F_{i+1,j} = (x_i + 1)^2 + z_j^2 - R^2 = F_{ij} + (2x_i + 1).$$

Величины $(-2z_j + 1)$ и $(2x_i + 1)$ называются константами дуговой (круговой) интерполяции в точке с координатами x_i и z_j .

Аналогично можно получить расчетные соотношения для оценочной функции в других квадрантах и при других направлениях движения. Суть заключается в том, чтобы записать выражения для новых значений координат при шаге в соответствующем квадранте по тем или иным осям в заданном направлении и полученные новые значения координат подставить в выражение для оценочной функции при дуговой интерполяции.

Интерполяция применяется для того, чтобы сократить объемы информации, вводимой в устройство ЧПУ, ограничившись лишь тем объемом, который необходим для однозначного определения траектории исполнительного органа.

Кроме задач интерполяции устройство ЧПУ выполняет все функции обработки информации, которые назывались выше.

§ 17.3. Управляющие программы для станков с ЧПУ

Как уже говорилось, управляющие программы для станков и другого технологического оборудования с ЧПУ представляют собой массивы чисел, записанных на том или ином носителе. Это могут быть и тексты, записанные обычным образом на бумаге, и перфоленты (бумажные или пластиковые), и магнитные записи на той или иной ферромагнитной ленте, в том числе и на обычной аудио компакт-кассете, и алфавитно-символьные массивы, записанные в устройствах компьютерной памяти, и лазерные диски.

Большое разнообразие методов составления, хранения, контроля и использования программ для станков с ЧПУ потребовало стандартизации ряда вопросов, относящихся к построению программ. Такого рода стандарты разработаны Международной организацией по стандартизации ISO. Основным является международный стандарт, который получил название код ISO-7bit. Применяется, хотя и в меньшей мере, код EIA, разработанный в рамках европейской стандартизации. Многие современные устройства ЧПУ спроектированы для работы в обоих кодах, но некоторые ориентированы лишь на один из названных кодов.

При унификации управляющих программ для станков с ЧПУ возникает три вопроса:

- необходимость унификации формата и состава кадра управляющей программы;
- необходимость унификации представления символов, образующих кадр управляющей программы;
- необходимость унификации процедур контроля информации, содержащейся в управляющей программе.

Текст кадра управляющей программы должен включать в себя числовую величину, определяющую заданное значение программируемого параметра, а также код или условное обозначение самого этого параметра. Обозначение или код того параметра, который программируется, в управляющей программе называется *адресом*, а следующее непосредственно за этим адресом значение данного программируемого параметра называется *подадресным выражением*.

Кадр управляющей программы в соответствии со стандартом ISO должен включать в себя следующие адреса:

- N — номер кадра, обозначаемый и сопровождаемый десятичными цифрами, изображающими данный номер;
- X, Y, Z — обозначения координатных осей, сопровождаемые десятичными цифрами, изображающими перемещения по данным координатным осям по отношению к положению исполнительного органа, достигнутому в предыдущем кадре, или абсолютное положение исполнительного органа, достигаемое в данном кадре;
- U, V, W — установочные перемещения по осям X, Y, Z соответственно;

- *G* — подготовительные команды, направляемые на устройство ЧПУ и устанавливающие режим его работы (например, *G01* означает линейную интерполяцию, а *G00* — быстрый ход);
- *M* — вспомогательные команды, направляемые непосредственно на механизмы станка и означающие команды типа «включить охлаждение» или «стоп-шпиндель»;
- *S* — обозначение числа оборотов шпинделя;
- *F* — обозначение величины подачи;
- *T* — обозначение номера используемого инструмента (для многоинструментных станков).

В состав кадра управляющей программы могут также входить и некоторые другие адреса, относящиеся как к органам станка, так и к инструменту.

Порядок следования адресов внутри кадра управляющей программы не стандартизован, но для удобства работы с текстом управляющей программы и ориентации в нем рекомендуется придерживаться какого-либо одного определенного порядка следования адресов, например, приведенного выше.

Текст любой управляющей программы в коде ISO-7bit должен начинаться с символа «%».

Простейшим способом получения текста управляющей программы является использование написанного на русском языке технологического процесса выполнения операций на данном станке с последующим кодированием команд на выполнение тех или иных действий, образующих данный технологический процесс, с помощью прилагаемой к каждому станку с ЧПУ инструкции по программированию.

Далее, имея текст управляющей программы, необходимо перенести его на программноноситель, воспринимаемый системой ЧПУ данного станка, например на перфоленту, магнитную ленту, CD-диск, или занести в память того или иного компьютера. При переносе текста на тот или иной программноноситель нет необходимости знать, как именно данный символ кодируется на данном программноносителе. В большинстве случаев достаточным оказывается умение работать с обычной клавиатурой, являющейся входным устройством для различной аппаратуры, осуществляющей кодирование и нанесение символов текстов управляющих программ на тот или иной носитель.

Однако необходимо знать принципы, согласно которым осуществляется подобное кодирование. В коде ISO-7bit, являющемся алфавитно-символьным кодом, для записи одного символа текста управляющей программы отводится один целый байт, т. е. восемь двоичных разрядов.

Алфавитные символы в этом коде представляют собой простое двоичное изображение порядкового номера буквы в латинском алфавите, например латинские буквы *A*, *B* и *C* кодируются двоичными цифрами соответственно 0000 001, 0000 010 и 0000 011.

Цифровые символы в качестве неопределенного атрибута имеют единицы в пятом и шестом разрядах соответствующего байта, а в более

младших разрядах записывается двоичное изображение самой этой цифры. Например, десятичные цифры 1, 2 и 3 будут кодироваться соответственно 0110 001, 0110 010 и 0110 011.

Восьмой разряд этого байта, не нужный для записи соответствующего алфавитного или цифрового символа, используется для так называемого *контроля по паритету*. Этот контроль заключается в том, что при кодировании того или иного символа независимо от его значения подсчитывается число единиц в его кодовой записи, и в восьмой (контрольный) разряд всегда добавляется единица, чтобы общее число единиц в записи этого символа было четным (нечетным). Тогда перед использованием (или же сразу после ввода данного информационного символа) прежде всего подсчитывается число единиц в его кодовой записи. Оно должно быть всегда четным (или же всегда нечетным — как будет решено при проектировании). В противном случае вырабатывается сигнал «ошибка».

Такой метод защиты и контроля информации управляющих программ отличается простотой реализации и применяется при подготовке управляющих программ в качестве стандартного. Однако он не лишен и некоторых недостатков. К числу важнейших из этих недостатков относятся:

- обнаружение, но не локализация ошибок кодирования;
- отсутствие защиты от кратных (например, двойных, т. е. одновременно произошедших в двух разрядах) ошибок.

Тем не менее в подавляющем большинстве случаев применение такого метода контроля оказывается достаточным.

В некоторых специальных случаях для контроля символов управляющих программ можно использовать запись символа не в одном, а в двух байтах.

Следует иметь в виду, что вопрос кодирования управляющих программ для внутримашинного представления в локальных вычислительных и управляющих сетях имеет свою историю. На первых этапах развития подобных систем обработки и использования информации, когда управляюще-вычислительная техника накладывала ограничения по объемам памяти, возникала задача уплотнения информации, что позволяло в ограниченном объеме памяти разместить большее число управляющих программ. При этом повышается информативность каждого кодового символа, но снижается помехоустойчивость.

Увеличение объемов запоминающих устройств при снижении их стоимости дает возможность принципиально иного подхода: введения дополнительных проверочных символов, повышающих достоверность информации при ее циркулировании по сетям мини- и микрокомпьютеров.

§ 17.4. Автоматизация технологической подготовки и программирования для станков с ЧПУ

Анализ технологических задач, возникающих в многономенклатурном производстве, показывает, что при их решении значительная часть

времени (более 20 %) затрачивается на поиск необходимой информации о выборе заготовки, оборудования, инструмента, режимов резания и др. Эта часть работ, выполняемых при технологической подготовке производства, может быть полностью автоматизирована.

Другим фактором, способствующим развитию систем автоматизации технологической подготовки производства, является возможность повышения качества получаемых при этом проектных решений, т. е. получение более совершенных технологических маршрутов, оптимизированных режимов резания, технически обоснованных норм времени, повышение уровня унификации и нормализации и, следовательно, снижение затрат на их внедрение.

Таким образом, автоматизированные системы технологической подготовки производства решают следующие основные задачи:

- сокращение цикла технологической подготовки производства и повышение производительности труда технологов;
- повышение качества и технико-экономического уровня технологических процессов;
- уменьшение трудоемкости и стоимости проектирования технологических процессов;
- уменьшение затрат на внедрение технологических процессов за счет повышения уровня их унификации, нормализации и стандартизации.

Современные автоматизированные системы технологической подготовки производства выполняют следующие основные функции:

- расчет заготовок, в том числе заготовок из проката, а также получаемых ковкой, холодной штамповкой, сваркой, литьем;
- проектирование маршрута обработки, при котором производится выбор способов обработки деталей, видов операций, оборудования на каждой операции, типа и характеристик приспособлений;
- проектирование операций и переходов, определение их последовательности внутри операции, выбор режущего, вспомогательного и измерительного инструмента для каждого перехода, расчет припусков на обработку, числа проходов инструмента, межоперационных размеров, а также некоторых других технологических параметров;
- определение режимов резания при обработке, включая выбор скорости резания, величин подач, оборотов шпинделя, а также проверку мощности привода главного движения и оптимизацию режимов резания по критерию максимума производительности, минимуму себестоимости и т. п.;
- техническое нормирование переходов, операций и технологического процесса в целом, а именно определение основного, вспомогательного штучного и штучно-калькуляционного технологического времени;
- оформление технологической документации согласно требованиям стандартов и вывод ее на печать и на видеотерминалы;
- сопровождение информационной базы, что подразумевает выполнение сервисных функций ввода, удаления, корректировки и просмо-

тра массивов информационной базы, а также некоторые служебные функции по ее обновлению;

- трассировку работы программного обеспечения, имеющую целью локализацию ошибок и установление причин их возникновения, что необходимо при отладке программного, методического и информационного обеспечения системы автоматизации технологической подготовки.

Методы автоматизированной технологической подготовки производства можно разделить на две группы, как показано на структурной схеме рис. 17.5.



Рис. 17.5. Структура методов автоматизированной технологической подготовки

К первой группе относятся так называемые методы *системно-структурного* синтеза технологических процессов. Суть их состоит в том, чтобы, основываясь на некоторых исходных технологических фактах и на известных следствиях из этих фактов, построить некую технологическую теорию, которую можно представить ветвящимся древовидным графом выбора решений. Далее строится система, реализующая процедуру выбора и синтеза технологических решений по принципу «сверху вниз». На базе таких теоретических концепций создаются алгоритмы и программы для компьютерного синтеза технологических процессов применительно к конкретным деталям и оборудованию.

Вторая группа методов, наоборот, основана на обобщении конкретного опыта по построению технологических процессов. Она также

известна под названием типизационных методов проектирования технологических процессов, или методов *многоуровневой типизации*. Эти методы включают разбиение деталей по группам, выделение деталей-представителей для каждой группы, проектирование и отладку типовых технологических процессов для деталей-представителей и создание обобщенного технологического процесса, пригодного для построения компьютерных алгоритмов и программ.

Названные методы автоматизации проектирования технологических процессов заканчиваются разработкой технологической документации в том или ином объеме.

Однако в практике эксплуатации технологического оборудования с ЧПУ возникает задача разработки текстов управляющих программ и последующего их представления в форме, пригодной для использования системами ЧПУ, на которые они ориентируются.

Здесь также возможны два предельных случая. В одном из них вся необходимая технологическая документация уже разработана и необходимо лишь закодировать ее в соответствии с инструкцией по программированию и нанести полученные таким образом тексты на соответствующий носитель. Во втором случае задача сокращения объема вводимой исходной информации заставляет вспомнить, что все данные, необходимые для разработки технологической документации, находятся на рабочем чертеже детали. Поэтому весьма актуальным является создание таких систем разработки управляющих программ для станков с ЧПУ, которые в качестве исходной использовали бы меньший объем информации о детали, чем ее содержится в подробной и всеобъемлющей технологической документации. Системы такого рода называют системами автоматического программирования (САП). Они характеризуются разным уровнем автоматизации, разной степенью использования типовых решений и ориентацией на различные группы оборудования.

Для систем автоматического программирования характерно построение по принципу *«процессор — постпроцессор»*. Под процессором в данном случае понимают не блок вычислительной машины, а *программу*, представляющую собой основную и инвариантную часть системы автоматизации программирования. Выходом процессора здесь является массив данных, полностью описывающих положение инструмента при обработке данной детали, безотносительно к станку, на котором будет производиться такая обработка. Форма представления этих данных стандартизована и должна соответствовать международному языку *«процессор — постпроцессор»*, называемому языком CLDATA (Cutter Location Data). «Привязка» этих данных к конкретному станку осуществляется с помощью специальной небольшой программы-кодировщика, называемой *постпроцессором*. Число поставляемых постпроцессоров, а также наличие инструкции по написанию постпроцессоров и возможность включения дополнительных постпроцессоров в систему автоматизации программирования являются одной из важнейших характеристик для сравнения и выбора той или иной системы.

Необходимо также учитывать, что при составлении управляющих программ для станков с ЧПУ программируются траектории движения исполнительных органов, а получаемый при этом контур изделия может сильно отличаться от этой траектории. Примером может служить сверление, где программируется лишь осевое перемещение инструмента, а получаемый диаметр отверстия определяется правильным выбором самого сверла.

В системах автоматического программирования следует говорить о типовых технологических схемах обработки типовых конструктивных элементов. Например, для такого типового конструктивного элемента, как фланец с крепежными отверстиями, принимается определенная технологическая схема обработки, предполагающая центровку всех крепежных отверстий, затем смену инструмента на сверло промежуточного диаметра обработку этим сверлом всех зацентрированных отверстий, еще одну смену инструмента на сверло окончательного диаметра и последовательное рассверливание всех крепежных отверстий этим сверлом. Возможны и другие технологические схемы обработки типового конструктивного элемента, но в качестве типовой принимается именно описанная.

Типовые технологические схемы обработки типовых конструктивных элементов сведены в классификационную схему, представленную на рис. 17.6.



Рис. 17.6. Классификация типовых технологических схем обработки

Системы автоматического программирования являются весьма разнообразными по уровню автоматизации, по применяемым компьютерным средствам, по распределению функций между человеком и компьютером, по распределению функций между программными и аппаратными средствами, по степени централизации и децентрализации, по характеру связи системы автоматизации программирования со станками с ЧПУ и т. д.

Широко известны и положили основание целому семейству систем автоматического программирования так называемые АПТ-образные языки описания исходных данных о детали, получившие свое название от термина Auto Programming Tools. Отечественным аналогом этой системы является так называемая система Текстран (технологический транслятор).

Контрольные вопросы

1. Что является основной особенностью систем ЧПУ?
2. Что такое управляющая программа для оборудования с ЧПУ?
3. Что такое кадр управляющей программы для оборудования с ЧПУ?
4. Что такое длина кадра управляющей программы для оборудования с ЧПУ?
5. Как следует понимать время отработки кадра управляющей программы для оборудования с ЧПУ?
6. На какие группы делится информация, входящая в состав кадра управляющей программы для оборудования с ЧПУ?
7. На какие группы делятся станки с ЧПУ по своему технологическому назначению и по функциональным возможностям?
8. Из каких функциональных блоков состоят системы ЧПУ?
9. В чем состоят функции блока-супервизора?
10. Какая именно информация должна содержаться в кадре управляющей программы для станка с ЧПУ.
11. Какие существуют способы технической реализации функциональных блоков систем ЧПУ?
12. В чем состоит управление разгоном в системах ЧПУ?
13. В чем состоит управление торможением в системах ЧПУ?
14. В чем состоит управление контурной скоростью в системах ЧПУ?
15. Что такое режим ввода информации в системах ЧПУ?
16. Что такое автоматический рабочий режим в системах ЧПУ?
17. Что такое режим вмешательства оператора в системах ЧПУ?
18. Что такое ручной режим в системах ЧПУ?
19. Что такое режим редактирования в системах ЧПУ?
20. Что такое режим вывода информации в системах ЧПУ?
21. Что такое режим вычислений в системах ЧПУ?
22. Что такое дисплейный режим в системах ЧПУ?
23. Что такое режим диагностирования в системах ЧПУ?
24. Что называется интерполяцией?
25. Что называется линейной интерполяцией?
26. Что называется дуговой (круговой) интерполяцией?
27. Как формируется оценочная функция при линейной интерполяции?
28. Как формируется оценочная функция при дуговой интерполяции?

29. Что называется константой интерполяции при линейной и при дуговой интерполяции?
30. Что собой представляют физически управляющие программы для оборудования с ЧПУ?
31. Что вызывает необходимость стандартизации управляющих программ для станков с ЧПУ?
32. Какие применяются стандарты управляющих программ для станков с ЧПУ?
33. Что такое формат кадра управляющих программ для станков с ЧПУ?
34. Что такое адрес кадра управляющих программ для станков с ЧПУ?
35. Что такое подадресное выражение в кадре управляющих программ для станков с ЧПУ?
36. Какие существуют адреса кадра управляющих программ для станков с ЧПУ?
37. Как кодируются символы в соответствии с кодом ISO-7bit?
38. Что такое контроль по паритету?
39. Каковы основные недостатки принципа контроля по паритету?
40. Чем обусловлена необходимость автоматизации технологической подготовки производства?
41. Какие основные задачи решают системы автоматизированной технологической подготовки производства?
42. Какие функции выполняют системы автоматизированной технологической подготовки производства?
43. В чем состоит системно-структурный синтез при автоматизации технологической подготовки производства?
44. В чем состоит многоуровневая типизация при автоматизации технологической подготовки производства?
45. Чем заканчивается работа системы автоматизации технологической подготовки производства?
46. Какие существуют разновидности систем автоматизированного программирования?
47. Что такое процессор и постпроцессор при автоматизированном программировании?
48. Что такое промежуточный язык «процессор-постпроцессор» при автоматизированном программировании?
49. Какие существуют типовые технологические схемы при токарной обработке?
50. Какие существуют типовые технологические схемы при фрезерно-сверльно-расточной обработке?

Глава 18

УПРАВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСАМИ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

§ 18.1. Производство деталей одного наименования с помощью традиционных автоматических линий

Рассмотренные выше системы переработки информации используются для контроля и управления работой одной единицы технологического оборудования, будь то управление оборудованием циклического действия, числовое программное управление или следящие системы, в том числе системы стабилизации. Но переработанная информация используется также и для управления совместной работой комплекса единиц технологического оборудования, индивидуальная работоспособность которых обеспечена одним из рассмотренных способов.

С точки зрения переработки и использования производственной информации все механообрабатывающее оборудование может быть разделено на две группы.

Первая группа представляет собой переналаживаемое оборудование, предназначенное для массового выпуска деталей одного наименования. Характерным примером такого оборудования являются традиционные переналаживаемые автоматические линии, например, в автомобильной, подшипниковой, инструментальной и электротехнической промышленности или промышленности вооружений. Здесь с точки зрения информационной технологии не стоит задача планирования и определения очередности запуска деталей, необходимо лишь обеспечить выполнение рабочего цикла автоматической линии и осуществлять мониторинг.

Вторая группа представляет собой переналаживаемое оборудование, предназначенное для выпуска деталей различных наименований, в том числе для мелкосерийного и серийного выпуска. Характерным примером такого оборудования являются переналаживаемые автоматические линии и участки, например, в станкостроительной, радиоэлектронной или в авиационной промышленности. Здесь в задачу информационной технологии наряду с обеспечением выполнения рабочего цикла, программным управлением отдельными единицами автоматического обо-

рудования и мониторингом входит также планирование и определение очередности запуска деталей.

В машиностроении существуют два метода изготовления деталей и сборки изделий — *непоточный* и *поточный*.

При *непоточном* методе производства детали изготавливают партиями на каждой операции, а оборудование размещают по производственной площади группами по технологическому принципу, например токарный, фрезерный, сверлильный или шлифовальный участки, без однозначной связи с последовательностью выполнения отдельных операций, задаваемой технологическим маршрутом. Сборку изделий также осуществляют партиями на определенных сборочных участках.

При *поточном* методе производства операции технологического процесса обработки и сборки закреплены за определенными единицами оборудования, которые расположены в порядке выполнения этих операций, а объект производства передается с одной операции на другую с помощью транспортных устройств. Основой такого производства является поточная линия, которой свойственны синхронность и ритмичность и которая характеризуется определенным промежутком времени, необходимым для выпуска одной детали. Этот промежуток времени называется *тактом* потока.

Если технологический процесс разделен на элементарные самостоятельно выполняемые и контролируемые операции, то он называется *дифференцированным*. При совмещении на одном рабочем месте достаточно большого числа элементарных операций обработки и контроля технологический процесс называют *концентрированным*. На практике применяют *параллельную, последовательную и смешанную* формы концентрации технологического процесса.

Автоматизация производственных процессов при массовом производстве деталей одного наименования может осуществляться на различных уровнях. Наиболее полной следует считать автоматизацию поточного производства на основе *автоматических линий*.

Традиционная автоматическая линия — это система автоматических машин, установленных в технологической последовательности и объединенных средствами транспортировки, загрузки, контроля, управления, а также удаления отходов.

Автоматическая линия комплектуется под определенный вид транспорта и связывается с ним устройствами загрузки (манипуляторами, промышленными роботами, лотками, склизами, подъемниками и др.). В состав автоматической линии наряду с рабочими должны также входить и холостые позиции, которые используются для осмотра и обслуживания. Если линия включает позиции, подразумевающие необходимость участия человека, то она называется *автоматизированной*.

Информация, обрабатываемая и используемая в традиционных автоматических линиях, может быть разделена на несколько групп в зависимости от вида конкретной автоматической линии. Она может поступать от датчиков, обрабатываться по своему характерному алго-

ритму и далее поступать на устройства индикации и исполнительные механизмы. Собирается с объекта управления и выдаваться на исполнительные механизмы информация может с различной периодичностью.

Классификация информации, собираемой, обрабатываемой и используемой на автоматических линиях различного типа, представлена в виде классификационной схемы на рис. 18.1.



Рис. 18.1. Классификация информации, используемой в автоматических линиях

По *технологическому признаку* различают линии механообработки, сборки, сварки, окраски, выполнения заготовительных операций, автоматического контроля и испытаний, термообработки и др.

По *степени технологической гибкости* различают информацию для непереналаживаемых линий, линий групповой обработки, а также для гибких линий. *Непереналаживаемые линии* проектируются для обработки одной конкретной детали с массовым масштабом выпуска. *Линии групповой обработки* проектируются для одной условной детали-представителя, которая включает в себя все характерные для данной группы деталей элементы. Примером такого рода деталей, относящихся к одной группе, могут служить вилки карданных валов, промежуточные валы коробок передач, ступицы колес автомобилей. *Гибкие линии* предназначены для обработки нескольких типов деталей и более подробно будут рассмотрены в дальнейшем. Следует различать *гибкие* автоматические линии и автоматические линии с *гибкой связью*. Гибкая связь между рабочими позициями — это такая связь, которая, как уже говорилось выше, действует только во время переходного процесса, но сама автоматическая линия при этом остается жесткой (непереналаживаемой). В автоматических линиях гибкость связи между рабочими позициями обеспечивается введением накопителей (бункеров) между позициями или участками. Основное назначение таких накопителей — локализо-

вать отказы и предотвратить остановку всей линии в случае временного прекращения работы какой-либо позиции. Накопители, применяемые на традиционных автоматических линиях, бывают *сквозные* или *тупиковые*. Сквозные накопители работают постоянно в режимах приема, выдачи или свободного пропуска заготовок (включены последовательно). Тупиковые накопители обычно устанавливаются на стыке участков автоматической линии, обладающих различной надежностью, и работают только в случае отказов соседних участков (включены параллельно). Жесткие связи имеют место тогда, когда деталь транспортируется непосредственно с одной рабочей позиции на другую. При этом, естественно, требуется согласованность времени обработки на соседних рабочих позициях.

По способу базирования заготовок на рабочих позициях различают обработку в спутниках и беспутниковую обработку. Беспутниковая обработка применяется тогда, когда транспортировка, ориентация и закрепление деталей на рабочих позициях не вызывают трудностей. К таким деталям относятся различного рода валы и диски, которые имеют оси симметрии. Для автоматизации транспортировки и обработки деталей сложной и/или неудобной конфигурации применяются спутниковые линии. На таких линиях детали устанавливаются в специальные *приспособления-спутники*. Спутник перемещается вместе с заготовкой по всем позициям обработки, вплоть до последней, а сама заготовка остается жестко закрепленной в спутнике. Возврат спутников на исходную позицию может осуществляться транспортером, расположенным сверху, снизу или сбоку автоматической линии, что во многом определяет ее компоновку.

Наконец, по-разному строятся и управляются собственно *автоматические* и так называемые *роторные* линии.

В первом случае процессы обработки и транспортировки деталей чередуются, т. е. заготовка перемещается между рабочими позициями, затем закрепляется на рабочей позиции, где производится выполнение соответствующей операции, затем перемещается на следующую рабочую позицию и т. д.

Во втором случае обработка совмещена с процессом перемещения заготовки. Роторные линии komponуются из загрузочных, транспортных и рабочих (технологических) роторов. Рабочий ротор представляет собой непрерывно вращающийся стол, по периферии которого устанавливаются детали. Над столом размещены соответствующие инструментальные блоки, инструментальные блоки вращаются синхронно с вращением рабочего стола и осуществляют рабочие движения под воздействием копира.

Роторные линии обеспечивают высокую производительность, но способны выполнять лишь простейшие операции, такие как прошивка, резка, дозировка и др. Они не могут вести точную обработку, а также выполнять обработку деталей сколько-нибудь сложных форм. Потому такие линии нашли свое применение главным образом в пище-

вой, оборонной и электротехнической промышленности при обработке без снятия стружки простых деталей методами штамповки, выдавливания, пайки, дозировки и др.

В традиционных автоматических линиях как прерывного, так и непрерывного действия (роторных или роторно-конвейерных) задача систем приема, обработки и использования информации сводится в основном к управлению автоматическим циклом и мониторингу, рассмотренным выше.

§ 18.2. Закрытые и открытые технологические семейства деталей

Все гибкие производственные системы (ГПС) как источники и адресаты информации могут быть разделены на две группы.

К первой группе относятся ГПС, предназначенные для выпуска с высокой производительностью крупных серий узкого спектра деталей, характеризующихся высокой степенью конструктивного и технологического подобия, так называемых *закрытых технологических семейств деталей*. Примером могут служить блоки цилиндров автомобильных двигателей, выпускаемые в вариантах на четыре или шесть цилиндров, или при неизменном числе цилиндров в вариантах, характеризующихся расточкой под гильзы цилиндров различного диаметра. Такие технологические задачи решают с помощью разновидности ГПС, называемой гибкой переналаживаемой линией (ГПЛ). Для обработки деталей на ГПЛ характерно наличие потока. Поток деталей в процессе обработки перемещается с заданным ритмом по связанным межстаночным транспортом рабочим позициям, расположенным в соответствии с технологическим маршрутом. Таким образом, маршрут движения детали в процессе ее обработки реализуется по принципу «станок — станок», причем этот маршрут определяется компоновкой оборудования, принимаемой в соответствии с маршрутной технологией еще на этапе проектирования всей гибкой переналаживаемой линии.

Ко второй группе относятся ГПС, предназначенные для выпуска деталей, характеризующихся невысокой степенью конструктивного и технологического подобия, так называемых *открытых технологических семейств деталей*. Примером могут служить самые разнообразные детали, выпускаемые обычными механическими цехами, оборудованными универсальными станками с ручным управлением. В таких ГПС не обязательно реализуется поточный метод производства, поэтому рабочие позиции на этапе проектирования размещаются по всей производственной площади не в линию, а исходя из удобства компоновки, эксплуатации и обслуживания оборудования, в том числе транспортных устройств. Детали на таких участках после окончания выполнения на той или иной позиции промежуточной операции технологического маршрута не передаются на рабочую позицию, выполняющую следующую операцию технологического маршрута, а поступают на буферный

склад-накопитель. Уже из этого склада они поступают на рабочую позицию, выполняющую следующую операцию технологического маршрута, причем это делается не сразу, а тогда, когда это окажется удобным с точки зрения организации всего производственного процесса. Таким образом, маршрут движения детали в процессе ее обработки реализуется не по принципу «станок — станок», а по принципу «станок — склад — станок». Этот маршрут определяется не компоновкой оборудования, устанавливаемой в соответствии с маршрутной технологией еще на этапе проектирования всей гибкой переналаживаемой линии, а специальными организационными директивными документами, называемыми *расписаниями загрузки оборудования*, составляемыми на этапе эксплуатации для данного производственного комплекса оборудования и для данной детали, обрабатываемой по конкретной маршрутной технологии. На основании подобных расписаний загрузки оборудования составляются *сменно-суточные задания по рабочим позициям*.

ГПС для обработки открытых технологических семейств деталей в зависимости от масштаба называются гибкими автоматическими модулями (ГПМ), гибкими автоматическим участками (ГАУ), гибкими автоматическими цехами (ГАЦ), гибкими автоматическими производствами (ГАП) и гибкими автоматическими заводами (ГАЗ).

Гибкие переналаживаемые линии (ГПЛ) строятся из быстропереналаживаемых станков, как правило, с ЧПУ. Причем к деталям, которые могут обрабатываться на такой линии, предъявляются дополнительные требования. Эти требования не только сводятся к большому конструктивному подобию таких деталей, но и подразумевают одинаковое или примерно одинаковое число позиций в их технологических маршрутах, а также сбалансированность времен выполнения обработки на соседних рабочих позициях.

Переналадка линии из станков с ЧПУ не сводится только к смене управляющих программ, но подразумевает также замену обрабатывающих инструментов, зажимных приспособлений, упоров, элементов транспортных устройств, захватов роботов-манипуляторов и др.

В случае использования в качестве базовых универсальных многоинструментных станков типа «обрабатывающий центр» замена инструментов из инструментального магазина производится в соответствии с управляющей программой. Вопрос состоит в том, как на гибкой переналаживаемой линии заменять комплекты инструментов в магазинах при переходе от обработки одной детали к другой.

Некоторые применяемые варианты структур автоматической смены комплектов инструмента приведены на рис. 18.2. Здесь представлены: 1 — станки с двумя инструментальными магазинами, каждый из которых обеспечивает обработку своей детали; 2 — станки с двумя поворотными магазинами, причем во время обработки, ведущейся по программе инструментами из одного магазина, комплект инструментов во втором магазине может вручную заменяться; 3 — станки с дополнительными магазинами-накопителями, причем обмен инструментами

между основным и дополнительным магазинами осуществляется автооператором во время работы станка; 4 — станки с дополнительными магазинами большой вместимости, установленными вне станка, причем обмен комплектами инструмента между внешним и рабочим магазинами осуществляется с помощью промышленного робота (в этом случае один внешний магазин может обслуживать несколько станков с ЧПУ).

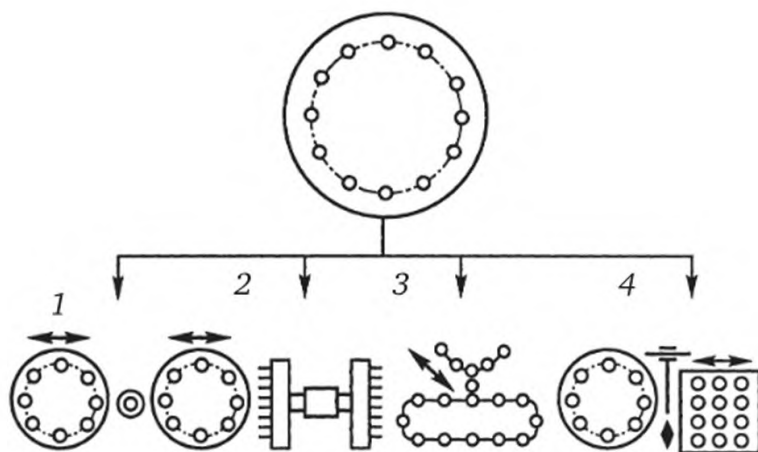


Рис. 18.2. Варианты структур устройств смены комплектов инструмента

Возможны и другие варианты замены комплектов инструмента в рабочем магазине, например доставка комплектов инструмента на робокаре и др.

Таким образом, для перехода к выпуску на переналаживаемой автоматической линии детали иного наименования нужно сделать следующее:

- завершить обработку на линии детали прежнего наименования, для чего, не останавливая линии, прекратить подачу на ее вход заготовок прежней детали;
- остановить линию;
- произвести ее переналадку, включая смену управляющих программ, замену комплектов инструмента, перестановку упоров, перенастройку транспортных устройств и т. п.;
- включить линию;
- осуществить подачу заготовок нового наименования деталей.

Следовательно, в каждый данный момент на переналаживаемой линии, предназначенной для обработки закрытых технологических семейств, будут проходить обработки детали только одного наименования. Для того чтобы перейти к обработке детали другого наименования, линию нужно остановить.

Если производится обработка открытого технологического семейства деталей на автоматизированном участке, выполняющем те же работы, что и участок универсальных станков с ручным управлением, то на станках с ЧПУ одновременно находятся детали разных наименований на разных операциях технологического маршрута. Задача орга-

низации производственного процесса на таком комплексе оборудования состоит в том, чтобы подавать на станки требуемые сменно-суточным заданием детали в нужном количестве и комплектовать их всем необходимым для выполнения операции обработки, а именно, управляющими программами, режущими инструментами и установочными приспособлениями.

Следовательно, в такого рода системах необходимо собирать и обрабатывать информацию не только о состоянии оборудования и инструмента, но и о ходе выполнения производственного задания. Информация о ходе выполнения производственного задания должна включать в себя:

- сведения о том, какие именно *детали* входят в тот или иной заказ из числа поступивших на данный участок;
- сведения о том, в какие именно *заказы* из числа поступивших на данный участок входят детали данного наименования;
- сведения о *прохождении обработки* деталью данного наименования;
- сведения о загрузке и состоянии данного *станка*;
- сведения о *выполнении и распределении по станкам* участка операций технологического маршрута.

§ 18.3. Автоматизация диспетчерского управления процессами механообработки

Системы диспетчерского управления станочными комплексами служат для координации в реальном масштабе времени работы технологического и вспомогательного оборудования, образующего единый производственный комплекс. Эти системы реализуют функции управления исполнением директивных указаний и плановых заданий. В зависимости от степени автоматизации функции диспетчирования выполняются либо персоналом, либо автоматически (большей частью с помощью компьютерных сетей), либо с помощью комбинации того и другого. При создании автоматизированных систем диспетчерского управления проблема состоит в том, чтобы небольшим числом типовых решений охватить практически неограниченное разнообразие вариантов станочных комплексов, различных по структуре, составу оборудования, масштабам и организации производства.

Трудность создания такого рода типовых решений обусловлена тем, что в системах диспетчерского управления источниками и адресатами информации являются либо технологические агрегаты, входящие в состав оборудования, либо терминалы, характерные для данного конкретного комплекса оборудования. Поступление и обработка информации должны при этом происходить в реальном масштабе времени. Решение здесь возможно при разделении (декомпозиции) системы управления на основную, инвариантную часть, так называемое ядро

системы, и на адаптируемую интерфейсную часть, которая служит для «привязки» системы управления к конкретному объекту.

Для осуществления подобной декомпозиции целесообразно использовать структурно-функциональный принцип, который можно назвать принципом программной организации по аналогии с применяемым в теории автоматического управления принципом программного управления. Принцип программного управления заключается в том, что для изменения во времени некоторого программируемого параметра осуществляют изменение по этому закону (по этой программе) некоторого управляющего параметра-уставки, а затем с помощью следящей системы преобразуют это изменение в изменение регулируемого параметра. Закон, по которому функционирует следящая система, остается неизменным.

Применительно к системам диспетчерского управления в механообработке этот принцип трансформируется следующим образом. Программа выполнения действий по организации и управлению ходом производственного процесса задается в виде массива конкретных директив, играющих роль уставки. Этот массив формируется для данной производственной смены рассматриваемого комплекса оборудования каждый раз заново. Алгоритмы управления ходом производства базируются на сопоставлении этого массива с данными о текущем состоянии процесса и выработке на основании результатов такого сопоставления тех или иных диспетчерских указаний. Таким образом, для каждого конкретного случая изменяются лишь массивы директив, а алгоритмы опроса датчиков и сопоставления результатов этого опроса с массивами-уставками остаются неизменными. К таким массивам-уставкам относятся:

- массивы сменно-суточных заданий;
- массив данных (динамическая модель) состояния автоматизированной транспортно-складской системы (АТСС);
- каталог библиотеки управляющих программ для оборудования с ЧПУ;
- массив данных о состоянии рабочих позиций.

Алгоритмы выработки диспетчерских указаний по результатам сопоставления данных о ходе производственного процесса с массивами-уставками формируются применительно к типовой структуре системы диспетчерского управления комплексом производственного оборудования. Они не должны изменяться как при проектировании конкретного комплекса производственного оборудования, так и в процессе его функционирования.

Типовая структура предполагает распределение комплекса технических средств управления по уровням иерархии. Наиболее распространенной является четырехуровневая система управления комплексом оборудования автоматизированного участка, при которой с технологическим и вспомогательным оборудованием взаимодействуют только устройства нижнего уровня (непосредственного управления). Взаимо-

действие же остальных уровней управления происходит только между рядом расположенными уровнями. Пример типовой структуры комплекса технических средств управления приведен на рис. 18.3.

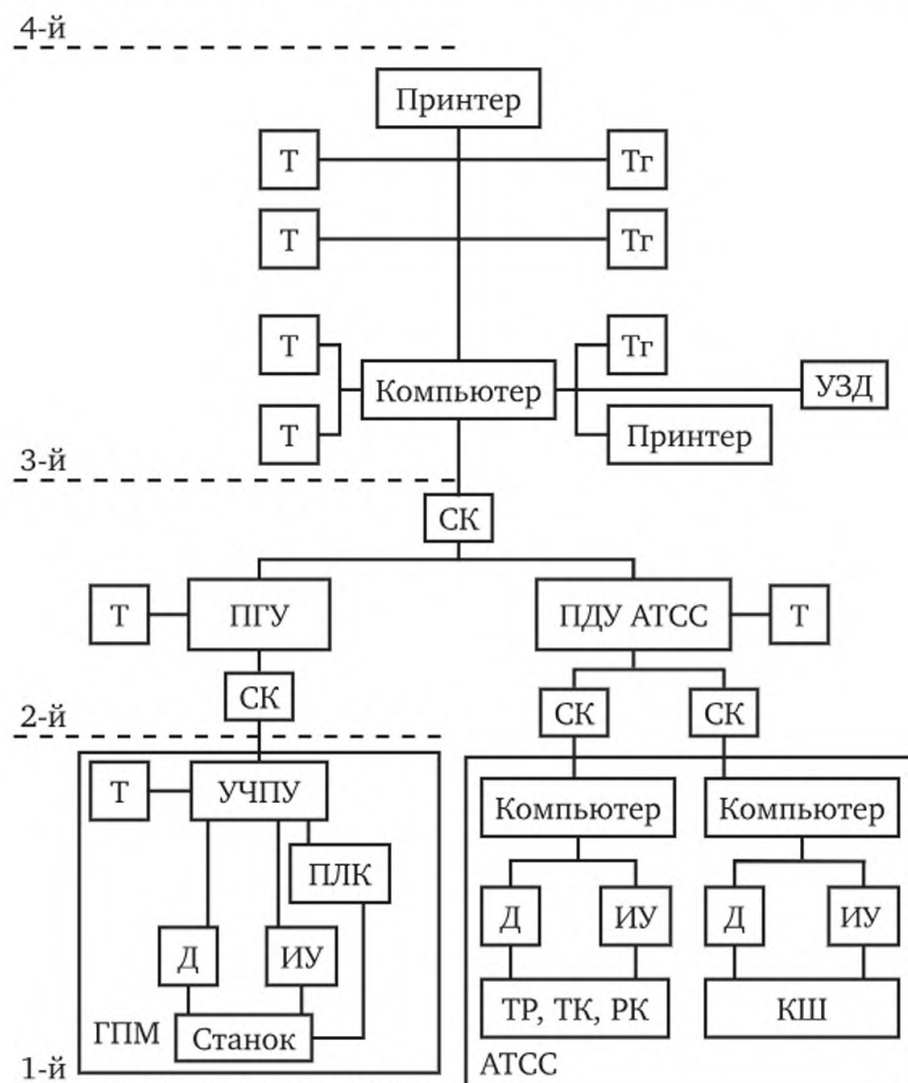


Рис. 18.3. Распределение КТС по уровням диспетчерского управления

На рис. 18.3 приняты следующие обозначения: ГПМ — гибкий производственный модуль, АТСС — автоматизированная транспортно-складская система, Д — датчики, ИУ — исполнительное устройство, ТР — транспортный робот, ТК — транспортные конвейеры, РК — робототележка, К. Ш — кран-штабелер, СК — средство комплексирования, ПГУ — пункт группового управления, ПДУ — пульт диспетчерского управления, Т — терминал, Тг — графический терминал, УЗД — устройство записи данных, УЧПУ — устройство числового программного управления, ПЛК — программируемый логический контроллер.

1-й уровень диспетчерского управления называется уровнем *непосредственного управления*. К нему относятся системы ЧПУ, а также устройства управления автоматическими циклами станков, в том числе на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК); бортовые системы управления робототележек; устройства управления адресова-

нием кранов-штабелеров; системы ЧПУ и первичной обработки результатов измерений, осуществляемых контрольно-измерительными машинами и другими агрегатами автоматического контроля; устройства управления промышленными роботами и другими грузозночно-установочными механизмами (устройствами циклового управления приводными рольгангами, поворотными столами, рельсовыми тележками, а также специализированными агрегатами, например моечно-сушильными установками).

2-й уровень диспетчерского управления называется уровнем *группового управления*. К нему относятся устройства, объединяющие в технологически однородные группы конструктивно различные агрегаты, а именно: пункты группового управления (ПГУ), объединяющие в целостную технологическую единицу ГПМ станки с ЧПУ и обслуживающие их специализированные грузозночные устройства, роботы и накопители; пульта диспетчерского управления (ПДУ) АТСС, согласующие движения адресуемых кранов-штабелеров, робототележек и других видов внутриучастковых транспортных средств; пункты управления контролем качества и др.

3-й уровень диспетчерского управления называется уровнем *диспетчеризации производства*. К этому уровню относится управляющий компьютер, который может, в частности, быть реализован в виде локальной вычислительной сети. Он координирует работу пунктов группового управления, пультов диспетчерского управления АТСС, а также других агрегатов 2-го уровня, обеспечивая их необходимыми массивами данных и директивными указаниями и получая от них соответствующую отчетную информацию.

4-й уровень диспетчерского управления называется уровнем *организационно-технологической подготовки*. На этом уровне располагаются устройства вычислительной техники, обеспечивающие формирование заданий для диспетчерского управления производством, и только через этот уровень происходит взаимодействие с вышестоящими и смежными службами предприятия.

В соответствии с такой типовой структурой диспетчерское управление функционирует следующим образом.

Событием, на которое должна реагировать система управления производственным комплексом, является окончание обработки детали на том или ином станке (рабочей позиции). Сигнал об этом событии возникает в соответствующем УЧПУ на нижнем уровне управления и поступает в ПГУ, к которому относится данный станок. ПГУ дает команду на снятие детали и размещение ее в локальном накопителе (при этом делается отметка в массиве данных о состоянии рабочей позиции), дает команду на перегрузку следующей по очередности заготовки из накопителя на станок (о чем также делается отметка в указанном массиве) и передает сигнал об окончании обработки данной детали в компьютер диспетчерского уровня.

Этот компьютер обращается к массиву сменно-суточных заданий, делает в нем отметку о выполнении на данном станке запланированной обработки данной детали и определяет следующую заготовку, которая должна быть доставлена на указанный станок. Затем формируется заявка на транспортировку, которая передается на пульт диспетчерского управления АТСС. Здесь происходит обращение к динамической модели склада, по которой определяется адрес соответствующей грузоединицы.

С учетом этого адреса вырабатываются директивы устройству непосредственного управления краном-штабелером, бортовому устройству управления робототележкой и грузораспределительному оборудованию (приводным рольгангам, поворотным столам, подъемникам и др.) на поиск и доставку к станку требуемой грузоединицы. Такой грузоединицей может быть, например, спутник с приспособлением и заготовкой, инструментальный комплект, кассета с заготовками и др.

По выполнении этих директив делаются соответствующие отметки в динамических моделях складов (в том числе инструментального) и в массиве данной рабочей позиции, а компьютер уровня диспетчеризации производства обращается к массиву каталога библиотеки управляющих программ. С помощью этого каталога отыскивается соответствующая управляющая программа, которая передается в ПГУ, а он принимает решение о выдаче в УЧПУ команды на обработку следующей детали.

Таким образом, для изменения производственной программы такого комплекса в процессе его эксплуатации необходимо лишь внести редакторские правки в указанные выше массивы-уставки. Прикладные программы, реализующие процедуру процесса диспетчирования, остаются при этом без изменения. «Привязка» такой системы диспетчирования к конкретному производственному комплексу осуществляется на этапе проектирования, а не на этапе эксплуатации и сводится в подбору вычислительных средств в соответствии с конфигурацией данного производственного комплекса и генерации пакета прикладных программ, подобно тому как это делается при генерации операционной системы требуемой конфигурации применительно к конкретному набору средств вычислительной техники.

§ 18.4. Организационно-технологическое управление многономенклатурным производством

Одним из основных достижений современной технологии машиностроения является определение принципиальных направлений развития автоматизации мелкосерийного и серийного производства. Эти пути заключаются в создании гибких автоматизированных производственных комплексов, таких как гибкие автоматизированные участки (ГАУ). Современная концепция ГАУ предполагает включение в его

состав не только технологического оборудования с ЧПУ, но и автоматизированных транспортно-складских систем, загрузочных устройств, устройств хранения и доставки инструмента, а также агрегатов, автоматизирующих вспомогательные операции (мойку, сушку, многопараметрический контроль и т. д.). Выдача команд на доставку нужной детали к нужному станку в нужное время и обеспечение соответствующими управляющими программами и инструментом процессов обработки осуществляются от управляюще-вычислительного комплекса, также входящего в состав ГАУ.

На ГАУ можно достичь высокого (до 0,9 и более) коэффициента использования станков, для чего необходимо обеспечить его эффективную загрузку во взаимодействии с остальным производством, смежными службами, руководящим персоналом и плановыми службами. Эта задача в условиях многономенклатурного производства оказывается весьма трудоемкой, и при традиционных методах ее решения сроки разработки планово-организационных мероприятий и документов не соответствуют требуемым срокам, которые определяются производственными возможностями ГАУ. Современным подходом является автоматизация разработки плановых документов и взаимообмена информацией между ГАУ и названными выше подразделениями на основе широкой компьютеризации.

Основное информационное понятие производственного процесса — это *партия обработки*. Партия обработки характеризуется шифром образующих ее деталей, относящимся к ней технологическим маршрутом, числом деталей в партии, плановой датой запуска, плановой датой выпуска, обеспеченностью и текущим состоянием.

Подготовку заказов, заданий, расписаний и других директивных указаний, предназначенных для ведения производственного процесса и направленных на исполнение с учетом ранее выданных указаний, принято называть *организационно-технологическим управлением*.

Организационно-технологическое управление должно охватывать все составные части ГАУ и функциональные связи между этими частями, возникающие в процессе производства.

Основными составными частями ГАУ являются:

- рабочие места;
- объекты обработки (партии деталей);
- компоненты производственного процесса, необходимые для его осуществления (заготовки, инструмент, приспособления, управляющие программы, рабочая сила, материалы, комплектующие изделия).

С точки зрения организационно-технологического управления на ГАУ должны выполняться следующие функции:

- учет наличия, заказ и управление поставкой заготовок, а также размещение их в накопителях;
- учет наличия, заказ и разработка управляющих программ и сопроводительной документации и размещение этих программ в памяти управляюще-вычислительного комплекса;

- учет наличия, заказ на комплектацию, сборку, заточку, регулирование, а также на другие виды подготовки инструмента;
- составление расписаний, т. е. формирование последовательности движения деталей и других грузоединиц между складом и станками, а также последовательности управляющих программ;
- учет наличия и заказ технологической оснастки;
- организация отправки и получения деталей с внешних операций;
- формирование последовательности выдачи управляющих программ на рабочие места;
- формирование последовательности доставки комплектов инструмента и оснастки к рабочим местам и удаления их оттуда;
- организация выгрузки готовых деталей из накопителей и отправки их с ГАУ с необходимыми сопроводительными документами.

Организационно-технологическое управление охватывает следующие *рабочие режимы, понятия и задачи*, которые будут рассмотрены ниже.

Предварительное планирование (ПП) — комплекс задач, включающий в себя оценку принципиальной выполнимости месячных планов запуска, формирование партий запуска и предварительного плана работ ГАУ, а также формирование заказа на заготовки. Отрезок ПП — это отрезок времени (обычно месяц), на который формируется предварительный план работы ГАУ.

Наличные и требуемые фонды времени работы оборудования — это фонды времени (месячные, квартальные и др.), необходимые для выполнения планов, а также те, которыми располагают различные группы оборудования. К этой же категории понятий относятся недостающие и неиспользуемые фонды времени по группам оборудования.

Оперативное планирование (ОП) — комплекс задач, включающий в себя формирование расписания работы оборудования и составление основных директивных документов, определяющих функционирование ГАУ на ближайшее время. К таким документам относятся сменно-суточные задания по рабочим местам ГАУ, задания на отправку партий на внешние операции, задания на отправку партий заготовок на обработку, задания на поставку комплектов инструмента и приспособлений. Этот комплекс задач может также содержать прогноз состояния процесса производства и рекомендации по улучшению его хода.

Оперативное планирование характеризуется следующими основными понятиями:

- *отрезок оперативного планирования* — это отрезок времени, для которого составляется расписание работы оборудования (смена, сутки, неделя, месяц);
- *сеанс оперативного планирования* — это отрезок времени, непосредственно затраченный на составление плана;
- *период оперативного планирования* — это отрезок времени между двумя соседними сеансами оперативного планирования (полусмена, смена, сутки);

- *расписание работы оборудования* — это формируемый в сеансе планирования график загрузки всех рабочих мест ГАУ, содержащий данные о времени начала и конца каждой выполняемой элементарной работы;

- *корректировка расписаний работы* — это изменение ранее составленного расписания в промежутке времени между двумя сеансами ОП;

- *сменное задание рабочему месту (на запуск и на выпуск) и задание на отправку партий на внешние операции* — это директивные плановые документы для системы диспетчерского управления или для персонала ГАУ;

- *задание на комплектование партий* — это директивный плановый документ для системы диспетчерского управления, формируемый при запуске партий.

При выполнении операций учета используются следующие данные:

- сведения о выполнении планового задания рабочими местами ГАУ (фактическая информация о работе, проделанной на рабочем месте за смену);

- сведения о выполнении внешних операций (фактическая информация о партиях обработки, поступивших на ГАУ после выполнения операций на внешнем оборудовании);

- сведения о браке (фактическая информация по партиям и операциям о числе деталей, которые следует исключить из партий обработки);

- сведения о ликвидации брака (фактическая информация по партиям и операциям о числе деталей, которые следует включить в партии обработки);

- план ликвидации дефицита заготовок (плановая информация, которая формируется при невыполнении плана поставки заготовок).

При планировании в рамках организационно-технологического управления решаются две принципиальные задачи. *Прямая задача планирования* заключается в формировании расписания работы оборудования по заданным исходным данным о составе оборудования и о директивных сроках выпуска. *Обратная задача планирования* заключается в выработке на основании расписания работы оборудования рекомендаций о необходимых изменениях исходных данных, например о необходимости введения сверхурочных работ.

Ряд известных критериев качества планирования (минимум времени простоя оборудования, максимум коэффициента использования оборудования, минимум суммарного времени переналадок и др.) имеет целью обеспечить максимум производительности. Однако при работе ГАУ в реальной производственной среде требуется достижение не максимальной, а заданной производительности, но с максимально возможной степенью вероятности (с минимумом риска). Поэтому считается целесообразным использовать алгоритм составления расписаний работы оборудования, использующий имитационное моделирование

движения так называемого фронта работ. Под фронтом работ понимается подмножество партий, для которых к моменту начала сеанса планирования имеются сведения об их полной готовности и обеспеченности для выполнения операции технологического маршрута, следующей за уже выполненной. Подобный алгоритм может быть использован как для предварительного, так и для оперативного планирования.

Функции системы организационно-технологического управления выполняются при работе любого производственного участка, автоматизированного в той или иной степени. Система организационно-технологического управления может работать как в составе АСУ ГАУ, так и автономно. В последнем случае она осуществляет обмен документами и массивами данных с персоналом.

Контрольные вопросы

1. На какие группы разделяются производственные комплексы автоматического оборудования?
2. Чем характеризуются традиционные автоматические линии?
3. Чем характеризуется поточный метод производства?
4. Чем характеризуется непоточный метод производства?
5. Что такое дифференцированный производственный процесс?
6. Что такое концентрированный производственный процесс?
7. Как komponуется традиционная автоматическая линия?
8. Как классифицируется использование информации в автоматических линиях по технологическому признаку?
9. Как классифицируется использование информации в автоматических линиях по степени гибкости?
10. Что такое обработка в спутниках?
11. Что такое автоматическая линия с жесткой связью?
12. Что такое автоматическая линия с гибкой связью?
13. Что такое роторная линия?
14. Каковы области применения традиционных автоматических и роторных линий?
15. К чему сводится задача переработки и использования производственной информации на традиционных автоматических и роторных линиях?
16. Что такое закрытые технологические семейства деталей?
17. Что такое открытые технологические семейства деталей?
18. Чем определяется движение по производственному комплексу для закрытых технологических семейств деталей?
19. Чем определяется движение по производственному комплексу для открытых технологических семейств деталей?
20. На каком этапе определяется маршрут движения по производственному комплексу для закрытых технологических семейств деталей?
21. На каком этапе определяется маршрут движения по производственному комплексу для открытых технологических семейств деталей?
22. На каких производственных комплексах обрабатываются закрытые технологические семейства деталей?
23. На каких производственных комплексах обрабатываются открытые технологические семейства деталей?
24. Какой документ определяет маршрут движения по производственному комплексу закрытых технологических семейств деталей?

25. Какой документ определяет маршрут движения по производственному комплексу открытых технологических семейств деталей?
26. К каким действиям сводится переход на обработку новой детали из закрытого технологического семейства?
27. К каким действиям сводится переход на обработку новой детали из открытого технологического семейства?
28. Какие существуют типовые схемы автоматической смены комплектов инструмента?
29. Что должна включать в себя информация о ходе производственного процесса?
30. Для чего служат системы диспетчерского управления производством?
31. В чем состоят особенности и трудности автоматизации систем диспетчерского управления производством?
32. В чем состоит принцип программной организации применительно к системам диспетчерского управления производством?
33. Какие массивы относятся к массивам-установкам при программной организации систем диспетчерского управления производственным комплексом?
34. На какие уровни разделяются системы диспетчерского управления производственным комплексом? Сколько таких уровней?
35. Какие виды компонентов располагаются на уровне непосредственного управления?
36. Какие виды компонентов располагаются на уровне группового управления?
37. Какие виды компонентов располагаются на уровне диспетчерского управления производством?
38. Какие виды компонентов располагаются на уровне организационно-технологической подготовки?
39. Что является производственным событием, вызывающим диспетчерские действия?
40. Какие действия производит диспетчерская система в ответ на происходящие производственные события?
41. Что остается неизменным в диспетчерской системе при различных производственных событиях?
42. Как принципиально решается задача автоматизации мелкосерийного и серийного производства?
43. Каким требованиям должны удовлетворять связи ГАУ с вышестоящими и смежными службами?
44. Что называется организационно-технологическим управлением?
45. Какие функции выполняет организационно-технологическое управление?
46. Что относится к составным частям производственного процесса на ГАУ?
47. Что является основным информационным понятием в организации производственного процесса механообработки?
48. Что определяется в результате планирования?
49. Что такое корректировка планов работы производственного комплекса?
50. Что такое прямая и обратная задачи планирования?
51. Что такое отрезок и интервал планирования?
52. Что такое режим предварительного планирования?
53. Какие бывают фонды времени, рассчитываемые в процессе производства?
54. Что такое режим оперативного планирования?
55. Что такое расписание работы оборудования?
56. Что такое сменно-суточное задание по рабочим местам?
57. Что такое задание на выполнение внешних операций?

58. Что такое задание на подготовку инструментальных комплектов?
59. Какие данные формируются при проведении учета хода производственного процесса?
60. Что является критерием качества планирования для участков, работающих в той или иной производственной среде?

Краткий словарь терминов

Автомат — устройство (совокупность устройств), которое без непосредственного участия человека осуществляет процессы приема, преобразования и/или использования энергии, вещества и/или информации.

Автоматизация управления производственным процессом — применение автоматических устройств и средств вычислительной техники для обеспечения требуемого хода производственного процесса.

Алгебра логики — раздел математики, который изучает законы, выражаемые формулами, построенными из высказывательных констант и переменных, а также из символов логических связей.

Алгоритм — сформулированные на некотором языке правило или набор правил, указывающие действия, последовательное выполнение которых приводит к искомому результату.

Архитектура в информатике — концепция взаимосвязи элементов сложной системы.

Аттестация — определение технико-эксплуатационных характеристик прибора и их сравнение с заданными по паспорту.

База данных — совокупность взаимосвязанных данных, допускающая их использование для одного или нескольких приложений в определенной предметной области человеческой деятельности.

Банк данных — совокупность программных, аппаратных, языковых, организационных и технических средств, предназначенных для централизованного сбора, хранения и коллективного использования данных об определенной области человеческой деятельности, а также сами эти данные в виде файлов, библиотек и не связанных между собой баз данных.

Бар-код — способ кодирования с помощью комбинаций штрихов различной толщины.

Блок-схема — изображение процесса, машины или устройства, на котором представляются только сложные функциональные узлы (блоки) и связи между ними.

Биморфный — состоящий из двух пластин.

Варикап — полупроводниковый прибор, применяющийся как электрическая емкость, изменяющаяся под воздействием приложенного напряжения.

Время переходного процесса — интервал времени, в течение которого отклонение величины на выходе устройства относительно уста-

новившегося ее значения становится меньше наперед заданной величины.

Выхаживание — этап заключительной фазы шлифования, осуществляемый на шлифовальном станке без подачи врезания.

Гибкое автоматизированное производство — производство изделий различных наименований, основанное на высокой степени автоматизации технологических операций, а также процедур транспортировки, контроля качества изделий, диагностики оборудования, складирования, проектирования изделий и технологической подготовки производства.

Гистерезис — явление отставания реакции выходной величины от изменения входной.

Граф — графическое представление связей между объектами произвольной природы.

Данные — различного рода информация, представленная в виде, удобном для ее хранения, переработки и дальнейшего использования.

Датчик — устройство, выдающее информацию об измеряемой величине в виде, пригодном для ее последующего использования.

Дискретизация — преобразование непрерывной величины в дискретную.

Диспетчеризация — осуществление оперативного контроля и управления на предприятиях, основанное на формировании, переработке и использовании информации о ходе производственного процесса.

Дифракция — явление огибания волнами (световыми, звуковыми и др.) препятствий.

Диффузия — явление проникновения молекул одного вещества в другое.

Диэлектрики — вещества, обладающие очень малой электрической проводимостью.

Емкость запоминающего устройства информационная — наибольшее количество единиц данных, которое может одновременно храниться в этом устройстве.

Живучесть — способность системы противостоять воздействию возмущающих факторов, сохраняя при этом работоспособность, хотя и с меньшей эффективностью, а также самовосстанавливаться (полностью или частично) после сбоев и отказов.

Заготовка — объект воздействия, из которого путем изменения формы, размеров, свойств и/или объема изготавливают деталь.

Задача системы управления — часть некоторой функции системы управления, которая может быть охарактеризована некоторым конечным или промежуточным результатом в конкретной форме.

Задел — определенное количество заготовок, полуфабрикатов или изделий, заранее собранных и подготовленных к какой-либо операции.

Запас — определенное количество каких-либо ресурсов, сосредоточиваемое для непредвиденных расходов.

Запись логическая — порция информации, которая является объектом или результатом одного шага обработки.

Защита информации — предохранение данных и программ от несанкционированного доступа.

Зона обслуживания автоматической линии — пространство для доступа к обслуживаемому оборудованию автоматической линии, хранению заготовок и готовых деталей, а также запасных комплектов инструмента.

Изделие — общее название любого штучного предмета в любой стадии изготовления.

Импеданс — полное сопротивление электрической цепи переменному току, обусловленное омическим, индуктивным и емкостным сопротивлениями.

Индуктивность — количественная характеристика связи между силой электрического тока в замкнутой цепи с магнитным потоком, создаваемым этим током.

Интерфейс — совокупность унифицированных технических и программных средств, используемых для сопряжения между устройствами или системами в вычислительной технике.

Информатика — наука о законах и методах измерения (оценки), хранения, переработки и передачи информации с применением математических и технических средств.

Информация — совокупность сведений (данных), воспринимаемых от окружающей среды, выдаваемых в окружающую среду либо сохраняемых внутри некоторой системы.

Калибровка — определение погрешностей и настройка приборов посредством сравнения измеряемой величины с эталоном.

Канал — совокупность устройств, предназначенных для передачи информации.

Канала связи пропускная способность — максимальная скорость передачи информации по каналу при заданных его характеристиках.

Кантователь — механизм для переворачивания (кантовки) деталей при их изготовлении, транспортировке и упаковке.

Кванты — частицы-носители свойств какого-либо поля.

Классификация — упорядоченное распределение объектов заданного множества.

Когерентность — согласованное протекание во времени нескольких колебательных или волновых процессов.

Код — совокупность знаков (символов) и система определения правил, с помощью которых информация может быть представлена в виде набора таких символов для передачи, обработки и хранения.

Коллиматор — оптическая система для получения пучка параллельных лучей.

Команда — предписание, определяющее шаг процесса выполнения программы.

Команд система — набор всех допустимых для данного компьютера указаний.

Комплекс — совокупность предметов или явлений, составляющих одно целое.

Компьютеризация — использование средств вычислительной техники, математических методов и специального программного обеспечения для сбора, хранения и переработки информации, используемой в различных процессах управления.

Контур электрический — замкнутая цепь проводников, по которой может протекать электрический ток.

Конвекция — перенос тепла, массы или зарядов движущейся средой.

Лазер — прибор для получения интенсивных и узконаправленных монохроматических и когерентных пучков светового излучения.

Линии автоматической участок — часть автоматической линии, которая может действовать самостоятельно за счет связи со смежными участками посредством накопителей.

Макрос — средство программирования, позволяющее в программах, составленных на некотором языке программирования, указать на необходимость вставки перед трансляцией определенного шаблона текста, настраиваемого по указанным аргументам.

Массив — многомерная структура данных, элементы которой упорядочены таким образом, что их описание однозначным образом определяет положение каждого элемента или путь доступа к нему.

Меню командное — список доступных пользователю на данном этапе команд, функций и действий, появляющийся на экране дисплея и предлагаемый для выбора.

Место рабочее автоматизированное — совокупность технических и программных средств на базе компьютерной техники, предназначенная для работы оператора в человеко-машинных системах.

Микропроцессор — устройство с большой степенью интеграции, выполненное по архитектуре универсальной ЭВМ.

Микросхема интегральная — микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигналов и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов, которые с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматриваются как единое целое.

Модель имитационная — математическая модель реального объекта, отражающая его поведение при заданных меняющихся во времени внешних воздействиях.

Модуль гибкий производственный — единица технологического оборудования, оснащенная устройствами автоматической смены инструмента и заготовок, удаления отходов, контроля и подналадки технологического процесса, управляемая с помощью сменяемых программ.

Модуляция — изменение параметров некоторого физического процесса в соответствии с текущими значениями передаваемого сигнала.

Монохроматическое — световое излучение одной определенной частоты.

Мультиобработка — одновременное использование нескольких обрабатывающих устройств для выполнения задания, относящегося к одному изделию.

Накопитель в вычислительной технике — часть запоминающего устройства, предназначенная для временного хранения информации.

Накопитель магазинный — емкость, служащая для сосредоточения запаса подлежащих обработке штучных изделий или инструментов в виде, готовом для выполнения рабочих операций.

Носитель данных — устройство, система или физическая среда, предназначенная для хранения в определенной форме различной информации.

Операнд — элемент данных, над которым выполняется операция.

Оператор в вычислительной технике — 1) предписание в данном языке программирования, задающее некоторое завершенное действие в процессе компьютерной переработки информации; 2) специалист, управляющий с пульта работой сложного оборудования.

Орган исполнительный — устройство, посредством которого осуществляется автоматическое воздействие на объект управления или регулирования.

Остеклованный — проводник, покрытый стеклянной оболочкой.

Память внешняя — память компьютера, реализуемая на внешних запоминающих устройствах различной физической природы.

Память оперативная — часть внутренней памяти компьютера, предназначенная для временного хранения команд, исходных данных, промежуточных и конечных результатов в процессе выполнения арифметических и логических операций.

Парамагнетики — вещества с магнитной проницаемостью, большей 1.

Передачи данных аппаратура — аппаратные средства для обеспечения взаимодействия каналов компьютеров с каналами связи.

Перерегулирование — максимальное отклонение регулируемой величины относительно ее установившейся величины.

Пирометр — прибор для измерения высоких температур (выше 600 °C).

Поиск информационный — процесс отыскания в некотором множестве данных таких, которые отвечают признакам, указанным в информационном запросе.

Помехи — воздействия, искажающие сигнал, несущий полезную информацию, в устройствах связи, управления, измерения, вычислительной техники и др.

Постпроцессор — программа или техническое устройство, предназначенное для заключительной обработки данных с целью адаптации формы их представления к требованиям потребителя.

Программа — полное и точное описание на некотором формальном языке или представление в некоторой форме предназначенных к выполнению работ.

Процессор — 1) центральное устройство компьютера или вычислительной системы, которое выполняет арифметические и логические операции, заданные программой преобразования информации, управляет вычислительным процессом и координирует работу периферийных устройств системы; 2) сложная логическая программа, входящая в состав системы автоматического программирования.

Регулятор автоматический — устройство в системе автоматического регулирования, которое вырабатывает воздействия на объект в соответствии с требуемым законом регулирования.

Режим мультипрограммный — способ организации и использования компьютера для совместного выполнения нескольких программ.

Режим «он-лайн» — режим работы вычислительной сети, при котором периферийные устройства или подчиненные компьютеры функционируют под непосредственным управлением центрального компьютера.

Режим «оф-лайн» — режим работы вычислительной сети, при котором периферийные устройства или подчиненные компьютеры функционируют автономно без управления со стороны центрального компьютера.

Режим пакетной обработки данных — режим выполнения совокупности заданий, при котором эти задания выполняются автоматически без связи с пользователями, предоставившими эти задания для выполнения.

Режим разделения времени — режим обработки данных, при котором ресурсы вычислительной системы предоставляются каждому процессу на интервалы времени, длительность и очередность которых определяется управляющей программой этой системы.

Режим реального времени — режим обработки данных, при котором обеспечивается взаимодействие вычислительной системы с внешними процессами в темпе, соизмеримом со скоростью протекания этих процессов.

Робот промышленный — автоматическая машина, предназначенная для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций, заменяющих аналогичные действия человека.

Световод — проводник светового излучения.

Сеть компьютеров — совокупность компьютеров, распределенных на некоторой территории и связанных между собой линиями передачи данных.

Сигнал — процесс, несущий сообщение (информацию) о каком-либо событии, явлении, состоянии объекта наблюдения либо передающий по каналу команды управления, указания, оповещения и т. д.

Символ — отдельный знак из заданного набора условных обозначений.

Система — совокупность взаимосвязанных объектов, подчиненных определенной единой цели с учетом условий окружающей среды.

Системотехника — научно-техническое направление, занимающееся вопросами проектирования, создания, испытания и эксплуатации сложных систем.

Соленоид — катушка, через которую пропускают электрический ток для создания магнитного поля.

СОТС — смазывающе-охлаждающие технологические среды.

Станка управляющая программа — совокупность команд, реализация которых обеспечивает выполнение заданного алгоритма функционирования станка при обработке конкретной детали.

Структура — совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе.

Темп — в промышленном производстве промежуток времени, в течение которого осуществляется выпуск одного изделия.

Теплопроводность — свойство тел передавать теплоту.

Термистор — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого зависит от температуры.

Термоэлектричество — явление возникновения ЭДС при нагревании точки соединения проводов из двух различных металлов или полупроводников.

Точка Кюри — температура, при которой ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Транспарант — световое сообщение, появляющееся на пульте индикации или управления.

Устройства периферийные — устройства для внешней компьютерной обработки информации.

Устройство арифметико-логическое — устройство, служащее для выполнения арифметических и логических операций над данными, поступающими из запоминающего устройства.

Устройство управления компьютера — устройство, обеспечивающее действие всех частей компьютера в соответствии с программой решаемой задачи.

Утилиты — вспомогательные системные программы операционных систем, обеспечивающие пользователей средствами обращения с данными.

Фазометр — прибор для измерения разности фаз между напряжением и током в цепях переменного тока промышленной частоты.

Файл — последовательность записей, размещаемая на запоминающих устройствах и рассматриваемая в процессе пересылки и обработки как единое целое.

Ферромагнетики — вещества с магнитной проницаемостью, равной 1.

Фотоэффект — явление изменения электрических свойств вещества под воздействием электромагнитных излучений.

Цель — идеальное мысленное предвосхищение результата деятельности.

Цепь электрическая — последовательное или параллельное соединение электрических элементов.

Цикл программы — многократно используемый в процессе вычислений участок программы.

Шина в компьютере или в вычислительной системе — группа каналов передачи информации, объединенная общим признаком.

Экранированный кабель — проводник, имеющий наружную оплетку, изолированную от центральной жилы и соединяемую с массой или заземлением.

Эпитаксия — ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки).

Эргономика — научная дисциплина, изучающая человека и его деятельность в условиях современного производства с целью оптимизации орудий, условий и процесса труда.

Язык моделирования — язык проектирования, на котором задается исходная информация для имитационного моделирования исследуемого объекта.

Язык программирования — формальный язык, применяемый для описания информации и алгоритма ее обработки на компьютере.

Рекомендуемая литература

1. Воронцов, Л. Н. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении / Л. Н. Воронцов, С. Ф. Корндорф. — М. : Машиностроение, 1988.
2. Датчики в современных измерениях. — М. : Радио и связь ; Горячая линия — Телеком, 2006.
3. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. — М. : Техносфера, 2007.
4. Измерения в промышленности. В 3 т. : справочник : пер. с нем. / под ред. П. Пафоса. — М. : Металлургия, 1989.
5. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. — Л. : Энергоатомиздат, 1983.
6. Машиностроение. Энциклопедия. Том IV-7. — М. : Машиностроение, 1999.
7. Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда. — М. : Мир, 1990.
8. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. — М. : Машиностроение, 1979.
9. Рогов, В. А. Основы высоких технологий : учеб. пособие / В. А. Рогов, Л. А. Ушомирская, А. Д. Чудаков. — М. : Вузовская книга, 2001.
10. Рогов, В. А. Электрические измерения физических величин / В. А. Рогов. — М. : РУДН, 1995.
11. Рогов, В. А. Электрические измерения физических величин измерительными преобразователями / В. А. Рогов. — М. : ОЛМА-ПРЕСС, 2002.
12. Спирин, Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. — Екатеринбург : ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет — УПИ, 2004.
13. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. — М. : Техносфера, 2005.
14. Черпаков, Б. И. Эксплуатация автоматических линий / Б. И. Черпаков. — М. : Машиностроение, 1990.
15. Чудаков, А. Д. Автоматизированное оперативно-календарное планирование в гибких комплексах механообработки / А. Д. Чудаков, Б. Я. Фалевич. — М. : Машиностроение, 1986.

16. Чудаков, А. Д. Системы управления гибкими комплексами механообработки / А. Д. Чудаков. — М. : Машиностроение, 1990.
17. Шандров, Б. В. Автоматизация производства (металлообработка). Федеральный комплект учебников / Б. В. Шандров, А. А. Шапарин, А. Д. Чудаков. — М. : Академия, 2002.
18. Шандров, Б. В. Технические средства автоматизации : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков. — М. : Академия, 2007.
19. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова ; под ред. В. М. Шарапова. — М. : Техносфера, 2006.

Новые издания по дисциплине «Средства автоматизации и управления» и смежным дисциплинам

1. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления : учебник для прикладного бакалавриата / И. Ф. Бородин, С. А. Андреев. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
2. Демин, А. Ю. Информатика. Лабораторный практикум : учеб. пособие для прикладного бакалавриата / А. Ю. Демин, В. А. Дорофеев. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
3. Жмудь, В. А. Системы автоматического управления. Прецизионное управление лазерным излучением : учеб. пособие для вузов / В. А. Жмудь. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
4. Казанский, А. А. Программирование на Visual C# 2013 : учебное пособие для прикладного бакалавриата / А. А. Казанский. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
5. Мамонова, Т. Е. Информационные технологии. Лабораторный практикум : учеб. пособие для прикладного бакалавриата / Т. Е. Мамонова. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
6. Мойзес, О. Е. Информатика. Углубленный курс : учеб. пособие для прикладного бакалавриата / О. Е. Мойзес, Е. А. Кузьменко. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
7. Рачков, М. Ю. Технические средства автоматизации : учебник для академического бакалавриата / М. Ю. Рачков. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
8. Серебряков, А. С. Автоматика : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Серебряков, Д. А. Семенов, Е. А. Чернов ; под общ. ред. А. С. Серебрякова. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
9. Технические средства автоматизации и управления : учебник для академического бакалавриата / О. С. Колосов [и др.] ; под общ. ред. О. С. Колосова. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
10. Храменков, В. Г. Автоматизация управления технологическими процессами бурения нефтегазовых скважин : практич. пособие для академического бакалавриата / В. Г. Храменков. — М. : Издательство Юрайт, 2018.
11. Черепяхин, А. А. Технология конструкционных материалов. Сварочное производство : учебник для академического бакалавриата /

А. А. Черепяхин, В. М. Виноградов, Н. Ф. Шпунькин. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018.

12. *Щепетов, А. Г.* Основы проектирования приборов и систем. Задачи и упражнения. Mathcad для приборостроения : практич. пособие для академического бакалавриата / А. Г. Щепетов. — 2-е изд., стер. — М. : Издательство Юрайт, 2018.

Наши книги можно приобрести:

Учебным заведениям и библиотекам:
в отделе по работе с вузами
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: vuz@urait.ru

Частным лицам:
список магазинов смотрите на сайте urait.ru
в разделе «Частным лицам»

Магазинам и корпоративным клиентам:
в отделе продаж
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru

Отзывы об издании присылайте в редакцию
e-mail: gred@urait.ru

Новые издания и дополнительные материалы доступны
на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»

Учебное издание

**Рогов Владимир Александрович,
Чудаков Александр Давидович**

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Учебник для вузов

Формат 70×100 1/16.
Гарнитура «Charter». Печать цифровая.
Усл. печ. л. 27,31

ООО «Издательство Юрайт»
111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru