

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

Под общей редакцией
О. С. Колосова

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Учебник



Курс с онлайн-
поддержкой

Юрайт
ПРАВО ОБОЗНАЧЕНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УЧЕБНИК ДЛЯ СПО

Под общей редакцией **О. С. Колосова**

Рекомендовано Учебно-методическим отделом среднего профессионального образования в качестве учебника для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования



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

Москва ■ Юрайт ■ 2024

УДК 65.011.56(075.32)
ББК 32.965я723
А22

Общий редактор:

Колосов Олег Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры управления и информатики института автоматизации и вычислительной техники Национального исследовательского университета «МЭИ» (Московского энергетического института).

Рецензенты:

Певзнер Л. Д. — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации Института информационных технологий и автоматизированных систем управления Национального исследовательского технологического университета МИСиС;

Лохин В. М. — доктор технических наук, профессор кафедры проблем управления Московского технологического университета (МИРЭА).

А22 Автоматизация производства : учебник для среднего профессионального образования / О. С. Колосов [и др.] ; под общей редакцией О. С. Колосова. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 331 с. — (Профессиональное образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-19351-0

Курс в разной степени (не претендуя на охват «необъятного») подкрепляет и дополняет материалы, излагаемые в соответствии с рабочими программами комплекса дисциплин профессионального цикла подготовки специалистов по направлению «Управление в технических системах», входящих в базовую и вариативную части учебного плана: метрология и измерительная техника; электроника; технические средства автоматизации и управления; микроконтроллеры и микропроцессоры в системах управления; элементы систем управления; электромеханические системы; автоматизированные информационно-управляющие системы.

Содержание курса соответствует актуальным требованиям федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по инженерно-техническим специальностям.

УДК 65.011.56(075.32)
ББК 32.965я723

Разыскиваем правообладателей и наследников Колосова О. С.: <https://www.urait.ru/inform@>
Пожалуйста, обратитесь в Отдел договорной работы: +7 (495) 744-00-12; e-mail: expert@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 978-5-534-19351-0

© Коллектив авторов, 2017
© ООО «Издательство Юрайт», 2024

Оглавление

Авторский коллектив	9
Список принятых сокращений.....	10
Предисловие	11
Тема 1. Автоматизированные системы управления, системы автоматики и автоматического управления и их технические средства	13
1.1. Классификации автоматизированных систем управления и систем автоматического управления. Обобщенные функциональные схемы. Понятие «SCADA-система»	13
1.2. Основные принципы построения автоматизированной системы управления производством	19
1.3. Особенности практического построения автоматизированных систем	21
1.3.1. Автоматизированная система управления технологическим процессом на базе программируемого логического контроллера для технических объектов	21
1.3.2. SCADA-система в структуре автоматизированной системы управления	24
1.3.3. ERP-системы в составе автоматизированной системы управления предприятием	27
1.3.4. Особенности построения автоматизированной системы научных исследований	28
1.4. Основные этапы и тенденции развития технических средств автоматизированных систем управления и систем автоматического управления.....	29
1.5. Принципы подбора технических средств проектируемой системы в соответствии с техническим заданием	31
1.5.1. Разработка технического задания на проектируемую систему.....	31
1.5.2. Базовые физические величины и соотношения для описания работы электромеханических средств систем автоматического управления.....	32
1.5.3. Пример задания на проектирование угловой следящей системы и основные этапы проектирования.....	35
Тема 2. Электрические датчики физических величин и параметров технологических процессов.....	38
2.1. Виды датчиков с электрическим выходом.....	38

2.2. Контактные и потенциометрические датчики.....	40
2.2.1. Контактные датчики	40
2.2.2. Реостатные и потенциометрические датчики	42
2.3. Тензометрические и пьезоэлектрические датчики.....	45
2.3.1. Пьезоэлектрические датчики	45
2.3.2. Тензометрические датчики	47
2.4. Индуктивные и трансформаторные датчики	48
2.4.1. Индуктивные датчики	48
2.4.2. Трансформаторные датчики.....	52
2.5. Емкостные датчики	53
2.6. Датчики температуры	56
2.6.1. Термометры сопротивления	56
2.6.2. Термопара	58
2.6.3. Пирометры	60
2.7. Ультразвуковые и струнные датчики	60
2.7.1. Ультразвуковые датчики	60
2.7.2. Струнные датчики.....	62
2.8. Фотоэлектрические датчики.....	63
2.8.1. Фотоэлектрические датчики с внешним фотоэффектом.....	64
2.8.2. Фотоэлектрические датчики с внутренним фотоэффектом	66
2.8.3. Фотоэлектрические датчики с вентильным фотоэффектом	66
2.9. Энкодеры	67
2.9.1. Оптические энкодеры	68
2.9.2. Магнитный энкодер.....	70
2.9.3. Магниторезистивный энкодер	70
2.10. Датчики Холла	71
2.11. Методика испытаний датчиков.....	73

Тема 3. Электромеханические средства систем

автоматического управления	74
3.1. Электромагниты, электромагнитные реле, трансформаторы.....	74
3.2. Электромашинные устройства автоматических систем.....	79
3.2.1. Классификация электрических машин	79
3.2.2. Машины постоянного тока.....	81
3.2.3. Машины переменного тока	98
3.3. Электромеханические устройства измерения рассогласования	130
3.3.1. Потенциометрические измерители рассогласования	131
3.3.2. Трансформаторные измерители рассогласования	134
3.3.3. Вопросы повышения точности измерителей рассогласования	142
3.4. Пример выполнения этапа выбора исполнительного двигателя с учетом силового редуктора при проектировании угловой следящей системы.....	143

3.5. Пример выполнения этапа расчета двухтактного усилителя мощности при проектировании угловой следящей системы	148
3.6. Пример выполнения этапа выбора элементов устройства измерения рассогласования при проектировании угловой следящей системы	153
3.7. Методика испытаний электрических микромашин.....	156
Тема 4. Усилительно-преобразовательные элементы автоматических систем и систем автоматического управления и микропроцессорные регуляторы	158
4.1. Преобразование сигналов в автоматических системах и системах автоматического управления	158
4.2. Демодуляторы и модуляторы	160
4.2.1. Однополупериодный демодулятор на поляризованном реле.....	160
4.2.2. Однополупериодный демодулятор на транзисторах в ключевых режимах	164
4.2.3. Однополупериодные транзисторные модуляторы.....	164
4.2.4. Двухполупериодные демодуляторы и модуляторы	166
4.3. Аналоговая и цифровая электроника.....	167
4.3.1. Операционные усилители.....	167
4.3.2. Цифровая электроника.....	171
4.4. Микропроцессорные регуляторы автоматических систем и систем автоматического управления.....	175
Тема 5. Аппаратно-программные средства автоматизации	179
5.1. Средства управления объектом автоматизации	179
5.2. Архитектурные возможности электронно-вычислительных машин в автоматизированных системах.....	181
5.2.1. Центральный процессор	182
5.2.2. Основная память.....	184
5.2.3. Каналы ввода-вывода информации	186
5.2.4. Структура магистрали электронно-вычислительных машин	188
5.2.5. Типовые сигналы шины управления.....	189
5.3. Принципы организации обмена данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами	190
5.4. Основные методы программно управляемой передачи данных.....	192
5.4.1. Безусловный обмен данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами	193
5.4.2. Обмен данными между электронно-вычислительной машиной и внешним устройством по готовности внешнего устройства.....	200
5.4.3. Обмен данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами с прерыванием текущей программы	210

5.5. Программируемые интервальные таймеры-счетчики	238
5.5.1. Основные характеристики счетчиков/таймеров	239
5.5.2. Программируемый таймер-счетчик Intel 8253, 8254	239
5.5.3. Схема включения программируемого интервального таймера в автоматизированную систему	240
5.5.4. Форматы регистров программируемого интервального таймера	242
5.5.5. Режимы работы таймера	245
5.5.6. Методика программирования работы каналов таймера	247
5.5.7. Синхронизация операций реального времени в электронно-вычислительных машинах семейства IBM.....	250
5.5.8. Назначение каналов программируемого интервального таймера в электронно-вычислительных машинах семейства IBM.....	250
5.5.9. Примеры программирования программируемого интервального таймера в среде Borland Pascal.....	252
5.5.10. Программируемый интервальный таймер Intel 8253 (К-580ВИ53) на интерфейсной карте L-154.....	254
5.6. Многоканальный режим измерения сигналов (основные понятия)	256
5.7. Обмен данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами в режиме прямого доступа к памяти	258
5.7.1. Функциональная схема соединения компонентов системы при выполнении обмена ПДП и алгоритм их взаимодействия	259
5.7.2. Программная модель КПДП и интерфейса внешнего устройства.....	261
5.7.3. Методика запуска обмена по каналу ПДП.....	263
5.7.4. Реализация ПДП в электронно-вычислительных машинах на основе единого магистрального канала обмена данными.....	265
5.7.5. Реализация ПДП в электронно-вычислительных машинах на основе изолированных каналов обмена данными (семейство IBM)	266
5.7.6. Режимы работы контроллера ПДП	266
5.7.7. Схема связи КПДП с внешним устройством, центральным процессором, системной шиной и назначение выводов большой интегральной схемы	267
5.7.8. Функциональный состав и программная модель контроллера ПДП.....	270
5.7.9. Регистры каналов контроллера ПДП.....	273
5.7.10. Регистр временного хранения данных при передаче память/память.....	276
5.7.11. Каскадирование контроллеров ПДП	277

5.7.12. Методика программирования контроллера ПДП	278
5.7.13. Реализация методики программирования контроллера ПДП.....	279
Тема 6. Программируемые логические контроллеры в системах автоматизации и управления	281
6.1. Понятие программируемого логического контроллера и области их применения.....	281
6.2. Состав программируемого логического контроллера	282
6.2.1. Модуль центрального процессора и его составляющие	284
6.2.2. Модули ввода/вывода.....	287
6.2.3. Сенсорные панели	290
6.3. Интерфейсы связи, используемые в программируемых логических контроллерах.....	291
6.3.1. Интерфейсы последовательной передачи данных RS232 и RS485.....	291
6.3.2. Интерфейс USB	295
6.3.3. Ethernet.....	296
6.3.4. Модемное соединение по проводной линии и радиоканалу.....	296
6.4. Стандартные языки программирования логических контроллеров	298
6.4.1. Релейные диаграммы.....	301
6.4.2. Функциональные блочные диаграммы	302
6.4.3. Последовательные функциональные диаграммы.....	304
6.4.4. Структурированный текст.....	305
6.5. Примеры программируемых логических контроллеров	306
6.5.1. Внешние модули ввода/вывода ADAM.....	306
6.5.2. Микроконтроллеры серии DL205 фирмы KOYO.....	308
6.5.3. Микроконтроллеры серии CP1L фирмы Omron	310
6.5.4. Микроконтроллеры серии MOSCAD фирмы Motorola	311
6.5.5. Микроконтроллеры серии ACE3600 фирмы Motorola.....	314
6.6. Примеры решаемых программируемыми логическими контроллерами задач и их решение.....	316
6.6.1. Задача автоматизированного управления накопительным баком.....	316
6.6.2. Управление трехцветными светофорами	320
Рекомендуемая литература	328

Авторский коллектив

Колосов Олег Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры управления и информатики института автоматизации и вычислительной техники Национального исследовательского университета «МЭИ» (Московского энергетического института) — общее редактирование, предисловие, темы 1, 3, 4.

Баларев Дмитрий Александрович — старший преподаватель кафедры управления и информатики института автоматизации и вычислительной техники Национального исследовательского университета «МЭИ» (Московского энергетического института) — темы 1, 6.

Вершинин Дмитрий Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры управления и информатики института автоматизации и вычислительной техники Национального исследовательского университета «МЭИ» (Московского энергетического института) — тема 4.

Есюткин Алексей Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры управления и информатики института автоматизации и вычислительной техники Национального исследовательского университета «МЭИ» (Московского энергетического института) — темы 1, 5.

Прокофьев Николай Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры управления и информатики института автоматизации и вычислительной техники Национального исследовательского университета «МЭИ» (Московского энергетического института) — тема 2.

Список принятых сокращений

- АРМ — автоматизированное рабочее место
АСНИ — автоматизированная система научных исследований
АСУ — автоматизированная система управления
АСУП — автоматизированная система управления производством
АСУТП — автоматизированная система управления технологическим процессом
АТК — автоматизированный технологический комплекс
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
БД — база данных
ВТ — вычислительная техника
ДВ — двигатель
ЗУ — запоминающее устройство
ИУ — исполнительное устройство
КТС — комплекс технических средств
О или ОУ — объект автоматизации (управления)
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
ПК — промышленный контроллер
ПЛК — программируемый логический контроллер
ПО — программное обеспечение
СА — автоматическая система
САУ — система автоматического управления
СУБД — система управления базами данных
ТЗ — техническое задание
ТОУ — технический объект управления
ТП — технологический процесс
УМ — усилитель мощности
УПУ — усилительно-преобразовательное устройство
УС — устройство сравнения (измеритель рассогласования)
УСО — устройство сопряжения с объектом
ЦАП — цифроаналоговый преобразователь

Предисловие

Технические средства автоматизации и управления образуют сложную и объемную часть общей профессиональной подготовки бакалавров по направлению 27.00.00 «Управление в технических системах». Достаточно сказать, что выпущенный в СССР в середине 1970-х гг. под редакцией В. В. Солодовникова уникальный трехтомник «Техническая кибернетика. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления» насчитывает свыше 2000 страниц текста. При этом морально устарело за прошедшие годы не более 20 % изложенного в трехтомнике материала. В то же время появляются качественно новые и совершенствуются известные элементы, используемые в практике построения автоматизированных и автоматических систем управления. К ним относятся: датчики технологических величин с электрическим выходом (аналоговым или цифровым), аналоговые и дискретные преобразовательные устройства, непрерывные и импульсные усилители мощности, исполнительные двигатели различных типов и мощностей, управляющие ЭВМ и контроллеры. Последние включают программируемые логические контроллеры (ПЛК), используемые в составе автоматизированных систем управления (АСУ), и промышленные контроллеры (ПК), применяемые для непосредственного управления объектом (технологическим процессом). Необходимыми элементами систем автоматизации являются устройства сопряжения объекта автоматизации (УСО) с управляющей ЭВМ. К ним относятся аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП), прерыватели, таймеры и т. п. Вся эта масса необходимой информации о технических средствах систем автоматизации и управления принципиально не может быть изложена в рамках одной дисциплины стандарта подготовки бакалавров с аналогичным названием.

Данный курс базируется на материалах учебно-методических комплексов дисциплин, читаемых преподавателями кафедры управления и информатики Национального исследовательского университета «МЭИ» студентам бакалавриата, обучающимся по направлению 27.00.00 «Управление в технических системах».

В конце курса приведен список рекомендованной литературы, ориентированный на соответствующие темы курса.

В силу того что различные вузы обладают разными возможностями для проведения лабораторных практикумов по названным

выше дисциплинам, а также большого разнообразия видов аппаратных средств, которые необходимо отразить хотя бы в минимальном объеме, методическое наполнение лабораторных работ здесь не рассматривается. Это же относится к тематике проведения практических занятий в соответствии с рабочими программами тех или иных дисциплин, в которых они предусмотрены.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам данного курса: доктору технических наук, профессору кафедры проблем управления Московского технологического университета (МИРЭА) Лохину Валерию Михайловичу и доктору технических наук, профессору кафедры автоматизации института «Информационные технологии и автоматизированные системы управления» Национального исследовательского технологического университета МИСиС Певзнеру Леониду Давидовичу за их труд по рецензированию, а также за конструктивную и полезную критику.

Тема 1

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ И АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ИХ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

1.1. Классификации автоматизированных систем управления и систем автоматического управления. Обобщенные функциональные схемы. Понятие «SCADA-система»

Стремительное развитие управляющей вычислительной техники во второй половине XX в. позволило успешно осуществлять комплексную автоматизацию не только в сферах материального производства, но и в документообороте, военном деле и сфере научных исследований. Помимо широко распространенных к тому времени таких понятий, как автоматические системы (СА) и системы автоматического управления (САУ), появляются автоматизированные системы управления (АСУ), к которым относятся: автоматизированные системы управления предприятием (АСУП), автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) и ряд других систем. Характерной особенностью любых АСУ является наличие в составе таких систем человека (оператора, исследователя или лица, принимающего решение (ЛПР)). Эта особенность отличает их от СА и САУ, которые полностью исключают участие человека в процессе управления. Вместе с тем в большинстве случаев АСУ, такие как АСУТП или АСНИ, могут содержать в своем составе различного рода СА и САУ.

Поясним сказанное, дав некоторые определения и рассмотрев примеры.

В любом автоматизированном комплексе можно выделить следующие основные компоненты.

1. *Объект (О) автоматизации или объект управления (ОУ)*, который должен воспринимать и соответствующим образом реа-

гировать на управляющие воздействия. В качестве объектов могут выступать:

- а) физические объекты:
 - технические комплексы и установки с управляемым технологическим процессом,
 - простые и сложные транспортные средства,
 - новые материалы и образцы приборов,
 - конструкции, испытываемые на прочность;
- б) физические модели объектов, например аэродинамическая труба с макетом самолета;
- в) математические модели, реализованные на аналоговых или цифровых электронно-вычислительных машинах (ЭВМ).

2. *Исполнительные устройства (ИУ), или устройства непосредственного управления объектом*, служат для изменения состояния объекта в соответствии с сигналами управления на их входах. В качестве ИУ могут выступать: исполнительные двигатели разных типов (ДВ), клапаны, переключатели и т. п. В состав ИУ могут также входить усилители мощности (УМ) и усилительно-преобразовательные устройства (УПУ), обеспечивающие согласование и усиление входных сигналов, поступающих на ИУ.

3. *Датчики (Д), или устройства измерения параметров объекта* (технологического процесса), служат для преобразования информации об объекте в форму, удобную для дальнейшего использования, — обычно в электрический сигнал. В автоматизированных системах измеряются различные физические величины: напряжение, ток, температура, давление, линейные или угловые перемещения и т. д.

Будем понимать под *управлением* некий процесс, обеспечивающий достижение поставленной цели. Управление техническими объектами можно разделить на три вида: ручное, автоматическое и автоматизированное. Ручное управление далее не рассматривается.

Автоматическое управление включает в себя две группы систем управления объектом, показанные на рис. 1.1. Это системы автоматики (СА), работающие по разомкнутому циклу, и замкнутые системы автоматического управления (САУ), помеченные на рис. 1.1 соответственно как а и б.

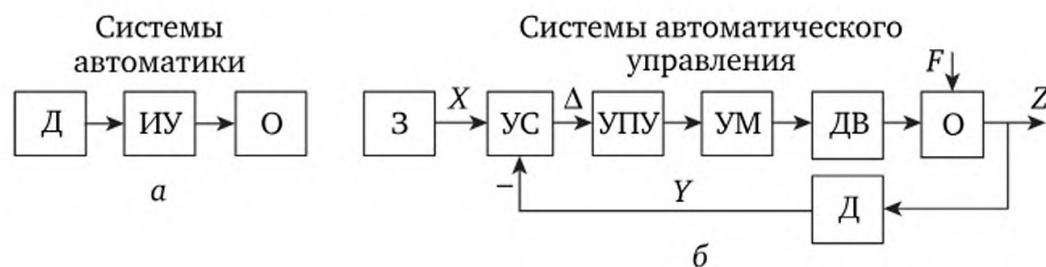


Рис. 1.1. Две группы автоматических систем

Системы автоматики — это системы автоматического контроля, сигнализации, пуска и остановки агрегатов, блокировки и защиты (см. рис. 1.1, а), которые обеспечивают безаварийную работу технологического оборудования, страхуют обслуживающий персонал от ошибочных действий и оперативно дают ему информацию о предельных значениях параметров технологического процесса. Для реализации подобных систем используются соответствующие датчики, индикаторы и автоматические выключатели.

К значительно более сложным автоматическим системам следует отнести САУ (см. рис. 1.1, б). Подобные системы во многих случаях являются так называемыми локальными автоматическими системами в составе общей АСУТП, обеспечивающей управление технологическим процессом сложного объекта.

В качестве простого примера рассмотрим «технологический процесс» управления скоростью и направлением движения корабля. Оба этих параметра задают операторы (капитан и рулевой). Предположим, что эти параметры (команды) на некотором временном интервале фиксированы. Обратимся к управлению направлением движения корабля. На рис. 1.1, б представлена функциональная схема САУ, реализующая подобное управление. Сигнал управления X , задающий угол поворота руля корабля, поступает от штурвала рулевого после соответствующего преобразования в виде электрического сигнала на вход устройства сравнения (УС) САУ. Блок 3 на схеме — это задающее устройство (в данном примере — сам рулевой). На УС также поступает сигнал отрицательной обратной связи Y от датчика (Д) углового положения руля корабля. Если разность этих сигналов Δ , которая в теории автоматического управления называется «ошибкой», не будет равна нулю, то эта разность, пройдя усилительно-преобразовательное устройство (УПУ) и усилитель мощности (УМ), поступает на двигатель (ДВ).

В качестве УПУ во многих системах используются промышленные контроллеры (ПК), которые могут также выполнять функции усилителя мощности. Двигатель через силовой редуктор будет разворачивать руль корабля (на схеме обозначен как О — объект управления) до тех пор, пока сигнал Y от датчика на руле корабля не станет равным задающему сигналу X . Это самый распространенный в САУ принцип управления «по отклонению». Достоинством такого принципа управления является то, что САУ «отрабатывает» не только сигнал управления X , но и компенсирует влияние возмущения F . В рассматриваемом примере это дополнительные механические моменты, действующие на руль корабля, связанные с подводными течениями, турбулентностью и т. д.

Фактически рассматриваемая САУ является усилителем мощности. Подобные системы называют «следящими системами», или «сервосистемами». Аналогично, укрупненно можно составить функ-

циональную схему управления скоростью движения судна. Составляющие функциональные блоки могут быть значительно сложнее, но в контуре обязательно сохранится отрицательная обратная связь.

Отметим, что СА и САУ принципиально исключают участие человека в процессе управления объектом (за исключением формирования сигнала уставки в САУ).

Автоматизированные системы управления технологическими процессами в технических объектах строятся по функциональной схеме, показанной на рис. 1.2.

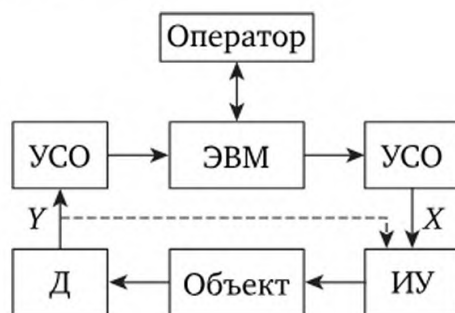


Рис. 1.2. Функциональная схема АСУТП

На схеме следует выделить два уровня управления: нижний и верхний.

Нижний уровень управления образуется самим объектом управления, датчиками (Д) состояния объекта и исполнительными устройствами (ИУ), включающими в себя требуемые усилители мощности и усилительно-преобразовательные устройства. Этот уровень управления может включать в себя СА и САУ, рассмотренные выше. На схеме пунктиром показана возможность использования сигналов датчиков Y для формирования отрицательных обратных связей САУ. Подобные локальные САУ образуют нижний уровень управления АСУТП сложными техническими объектами.

Верхний уровень управления содержит управляющую ЭВМ или программируемый логический контроллер (ПЛК) с доступом к ним оператора и устройства сопряжения с объектом (УСО). Программируемый логический контроллер по существу является управляющей ЭВМ, но, в отличие от универсальной ЭВМ, реализует определенную, ограниченную часть функций последней. Массовое производство различных ПЛК позволяет во многих случаях реализовывать более дешевые и более производительные структуры АСУТП с использованием сети ПЛК. Вместе с тем знание основных принципов построения АСУТП на базе универсальных ЭВМ позволяет грамотно и оптимально строить АСУТП с использованием ПЛК. Именно поэтому далее, в теме 5 рассматриваются эти принципы применительно к АСУТП на базе универсальных ЭВМ, а тема 6 целиком посвящена особенностям реализации таких принципов на ПЛК.

Любая АСУТП — это совокупность технических и программных средств для: управления объектом автоматизации, измерения его параметров, обработки хранения и отображения информации. Для нее характерны задачи измерения параметров объекта автоматизации в реальном времени и управления объектом в соответствии с сигналами, поступающими с датчиков объекта.

Устройства сопряжения с объектом соединяются с внутренней шиной компьютера одним из следующих способов:

- 1) через один из слотов расширения, имеющийся в любой ЭВМ;
- 2) через последовательный или параллельный порт, также входящие в состав ЭВМ;
- 3) через унифицированную последовательную или параллельную интерфейсную шину, специально предназначенную для подключения к ЭВМ.

Отметим, что ПЛК, как управляющие ЭВМ, уже снабжены УСО, в виде точек входа/выхода, к которым непосредственно подключаются датчики и маломощные ИУ. Для передачи информации часто используются пакетные (Ethernet) технологии передачи данных по локальной компьютерной сети. При управлении ИУ большой мощности, к выходам ПЛК подключаются УПУ или УМ.

Аппаратные средства УСО на входе (как правило) только преобразуют входные аналоговые сигналы в цифровой код и посылают его в компьютер. Эти функции УСО могут выполнять самостоятельно некоторые виды датчиков со встроенными микропроцессорами. Отдельно эти виды датчиков в курсе не рассматриваются. Задача вычисления исходных значений входных сигналов оставляется прикладному ПО, которое находится в компьютере.

Программное обеспечение ЭВМ (ПЛК) должно содержать:

- 1) программы для управления аппаратными средствами УСО, называемые драйверами устройств;
- 2) прикладное ПО, которое выполняет различные виды обработки сигналов.

Драйверы включают набор команд управления УСО и уникальны для каждого типа устройств. Они решают следующие задачи:

- конфигурирование аппаратуры УСО;
- запуск аппаратуры УСО на выполнение требуемой функции, например измерение сигналов объекта автоматизации или формирование управляющих сигналов на входах объекта;
- передача данных между УСО и оперативным запоминающим устройством (ОЗУ) ЭВМ.

Устройства сопряжения с объектом с помощью драйверов управляет объектом автоматизации, измеряют сигналы датчиков и в ряде случаев отображают данные.

Прикладное ПО обеспечивает: выработку и посылку команд драйверам, получение ответа о результате их выполнения, анализ,

обработку и отображение получаемых данных. Роль прикладного ПО играет пользовательское приложение, которое решает перечисленные задачи.

При использовании универсальной ЭВМ для построения АСУТП пользователи не ограничены типами устройств, которыми можно управлять. В этом случае можно сочетать и согласовывать между собой устройства различных категорий, такие как: внутримашинные, последовательные интерфейсы, унифицированные интерфейсные шины (например, КАМАК¹), параллельные порты и др.

Будем далее условно относить к системам автоматизированного управления предприятием (АСУП) такие, которые не содержат двусторонних средств непосредственной связи с объектом автоматизации. В зависимости от наличия или отсутствия односторонних связей АСУП с объектом возможны три варианта систем:

1) АСУП, не содержащие средств непосредственного сопряжения с объектом ни по входам, ни по выходам. Они предназначены для обработки информации вне реального времени. Параметры объекта оператор может вводить в систему вручную, а результаты обработки информации используются оператором для ручного управления объектом;

2) АСУП, содержащие только средства ввода информации от объекта в систему. Они предназначены для регистрации информации, поступающей с объекта в реальном времени (в темпе ее поступления) и ее дальнейшей обработки. Управление объектом, если возможно, выполняется оператором вручную;

3) АСУП, содержащие только средства непосредственного вывода управляющей информации на ОУ. Они предназначены для программного управления объектом.

Таким образом, АСУТП, в отличие от АСУП, — это системы, имеющие и средства непосредственного ввода информации с объекта, и средства непосредственного вывода управляющих сигналов на объект. Они образуют замкнутые автоматизированные системы, обеспечивающие автоматический сбор информации, ее обработку и управление объектом автоматизации.

Например, управление выходными параметрами парогенератора тепловой электрической станции (ТЭС) такими как температура, давление и объем генерируемого пара, а также количество и состав примесей в отходящих газах, регулируются совместно работающими САУ подачи топлива, воды, воздуха, регуляторами температуры пара. Параллельная работа парогенераторов и турбогенераторов на ТЭС осуществляется через общий диспетчерский центр, который в итоге отслеживает качество вырабатываемой электрической энер-

¹ КАМАК (англ. CAMAC) — стандарт, определяющий организацию магистрально-модульной шины, предназначенной для связи измерительных устройств с цифровой аппаратурой обработки данных в системах сбора данных.

гии. Таким образом, ТЭС оказывается АСУ, которая, по существу, сочетает АСУП с рядом АСУТП, СА и САУ на нижнем уровне.

Аббревиатура «SCADA — *Supervisory Control and Data Acquisition*» в дословном переводе — «диспетчерский контроль и сбор данных». Понятие «SCADA-система» на момент написания курса имеет двойную интерпретацию:

- 1) как вся система АСУТП в целом;
- 2) как человеко-машинный интерфейс диспетчерского (НМИ — *Human Machine Interface*) пункта управления и программные средства сбора и хранения данных с ОУ.

Для того чтобы избежать путаницы в терминах, мы будем в дальнейшем употреблять термин SCADA, ориентируясь на вторую интерпретацию в соответствии с представленным определением. Всю систему целиком мы называем АСУТП.

Многие разработчики ПО для АСУ предлагают комплексную программную систему, предназначенную для функционирования АСУТП и АСУП. Также предлагаются отдельные программные продукты SCADA (ПО для АСУТП) и продукты ERP — *enterprise resource planning* (ПО для АСУП). Краткая информация о программных продуктах ERP дается в п. 1.3.3.

1.2. Основные принципы построения автоматизированной системы управления производством

Принципы построения АСУТП определяются текущим уровнем развития технических и программных средств, но сами принципы в основном остаются неизменными. Перечислим и прокомментируем их.

1. *Применение ЭВМ в качестве центрального компонента АСУТП.* Основные достоинства применения ЭВМ в автоматизированной системе (с точки зрения решения задач реального времени):

- время реакции ЭВМ на внешние воздействия составляет единицы микросекунд и может достигать долей микросекунд;
- способность принимать в свои запоминающие устройства (ЗУ) большие объемы информации со скоростью до сотен мегабайт в секунду;
- возможность быстрой перестройки алгоритмов (программными средствами) и методики управления объектом автоматизации;
- диалоговое взаимодействие с оператором позволяет последнему эффективно взаимодействовать с работающей системой. Средства отображения данных и непосредственного вмешательства в работу АСУТП имеются в составе ЭВМ.

2. *Иерархический принцип построения АСУТП.* В соответствии с этим принципом, АСУТП на верхнем уровне управления могут строиться из отдельных подсистем АСУТП, которые, в свою очередь,

функционально делятся на два уровня — объектно-ориентированный (нижний) и инструментальный (верхний).

Объектно-ориентированные подсистемы нижнего уровня, как правило, располагаются вблизи от объекта автоматизации и предназначены для решения следующих задач:

- измерение параметров объекта в реальном времени;
- управление объектом;
- сбор данных измерений;
- оперативная обработка данных, временное хранение, представление данных оператору и пересылка их в АСУ инструментального уровня. В состав объектно-ориентированных подсистем нижнего уровня могут входить СА и САУ.

Инструментальные подсистемы верхнего уровня, которые можно отнести к SCADA-системам (могут находиться вдали от объекта автоматизации) предназначены для решения таких задач:

- подготовки и отладки программ и пересылки их в объектные подсистемы;
- управления объектными подсистемами;
- обработки информации в режиме разделения времени;
- накопления и длительного хранения больших массивов информации;
- документирования результатов исследований.

Многоуровневые системы экономически выгодны, так как объектные подсистемы могут быть построены без дорогостоящей периферии с использованием ПЛК.

3. *Модульный принцип построения аппаратных средств АСУТП.* Этот принцип предусматривает использование отдельных законченных модулей фиксированного назначения в качестве элементов АСУТП. Под модулем в АСУТП подразумевается отдельное устройство. В случае построения АСУТП на базе универсальной ЭВМ к модулям можно отнести аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП), таймеры и т. д. Кроме того, в общем случае к ним же относятся ПЛК, УПУ, УМ, устройства связи и т. п., из которых система собирается как «из кубиков» внутри шкафа автоматизации. Такой подход обеспечивает легкую и быструю замену вышедшего из строя модуля системы на аналогичный, а также упрощает модернизацию системы.

4. *Принцип программной управляемости модулей* означает такую их схемную реализацию, которая дает возможность программным путем с помощью определенного набора команд управлять работой отдельных модулей. Программная управляемость элементов АСУТП позволяет оперативно изменять алгоритм работы системы в зависимости от требований оператора.

5. *Принцип магистральной организации системы* в основном доминирует в АСУТП. Он предусматривает наличие общей системы

шин — магистрали, к которой подключаются отдельные функциональные элементы АСУ, в том числе ЭВМ. Магистральный принцип обеспечивает одинаковую доступность модулей для центрального элемента системы, т. е. ЭВМ. В системе с общей магистралью обращение к тому или иному модулю осуществляется путем его адресации, точно так же, как это делается в ЭВМ при обращении к ячейке ОЗУ. Наличие общей магистрали упрощает подключение новых модулей в систему и тем самым возможность расширения и гибкость АСУТП.

Вместе с тем широкое распространение разнообразных по возможностям и стоимости ПЛК во многих архитектурных построениях АСУТП позволяет отойти от принципа общей магистрали, поскольку в одной АСУТП может оказаться несколько совместно работающих ПЛК, каждый из которых выполняет свои функции управления на своем уровне. При этом эффективность работы таких АСУТП порой возрастает по сравнению с системами с одним центральным процессором.

6. *Принцип унификации аппаратных и программных средств* позволяет:

- использовать ограниченный набор аппаратных модулей, выполненных в соответствии с определенными стандартами, для реализации измерительных и управляющих каналов в самых различных АСУТП;
- снизить объем разрабатываемого аппаратного и программного обеспечения, сократить сроки разработки, отладки и модификации программных средств.

Этот принцип приводит к реализации «открытых» систем. Применительно к АСУТП открытой называется модульная система, которая допускает замену любого модуля на аналогичный модуль другого производителя, имеющийся в свободной продаже по конкурентоспособным ценам, а интеграция системы с другими системами (в том числе с пользователем) выполняется без преодоления чрезмерных проблем. На практике это достигается за счет того, что большое количество современных устройств автоматики используют стандартизированные протоколы передачи данных, а также обладают стандартизированными электрическими параметрами.

1.3. Особенности практического построения автоматизированных систем

1.3.1. Автоматизированная система управления технологическим процессом на базе программируемого логического контроллера для технических объектов

В зависимости от сложности ТОО разрабатываемые АСУТП могут базироваться на одной управляющей ЭВМ (ПЛК), как показано

на рис. 1.2, либо на комплексе ПЛК, реализующих ряд автономных АСУТП с единым программным обеспечением в виде SCADA-системы. Обобщенная функциональная схема такой АСУ, включающая уровень АСУП, показана на рис. 1.3. В подобной системе предполагается совместное использование SCADA- и ERP-систем для одновременной работы АСУП и АСУТП. Взаимодействие этих двух систем на уровне предприятия позволяет уточнить и конкретизировать критерий управления АСУТП как соотношение, характеризующее качество функционирования ТОУ в целом и конкретные числовые значения отдельных показателей в зависимости от используемых управляющих воздействий. Критериями управления могут быть:

- технико-экономический показатель (себестоимость, производительность ТОУ и т. п.);
- технический показатель (параметр процесса, характеристики выходного продукта).

Система управления ТОУ является АСУТП в том случае, если она осуществляет управление ТОУ в целом в темпе протекания ТП и если в выработке и реализации решений по управлению участвуют средства ВТ и другие технические средства и человек-оператор.



Рис. 1.3. Функциональная схема АСУ сложным техническим объектом на базе ПЛК

Функции АСУТП в целом — это совокупность действий отдельных подсистем АСУТП, реализованных на ПЛК, направленных на дости-

жение частных целей управления каждой из этих подсистем. Функции подсистем АСУТП при этом подразделяются:

- *направляющие*, результатом которых являются выработка и реализация управляющих воздействий на ТОО (регулирование или стабилизация отдельных технологических переменных, однократное логическое управление операциями или аппаратами, программное логическое управление группой оборудования, оптимальное управление установившимися или переходными технологическими режимами, адаптивное управление объектом в целом);
- *информационные*, содержанием которых являются сбор, обработка и предоставление информации о состоянии автоматизированного технологического комплекса (АТК) оперативному персоналу или передача этой информации для последующей обработки. Сюда входят: централизованный контроль и измерение технологических параметров, косвенное измерение параметров процесса, формирование и выдача данных оперативному персоналу АТК, подготовка и передача информации в смежные системы управления, обобщенная оценка и прогноз состояния АТК и его оборудования. Отличительная особенность управляющих и информационных функций АСУТП — их направленность на конкретного потребителя (ТОО, оперативный персонал, смежные системы управления);
- *вспомогательные* — это функции, обеспечивающие решение внутрисистемных задач. Они имеют потребителя вне системы. Это контроль функционирования и состояния технических средств, контроль над хранением информации и т. п.

Состав АСУТП:

- техническое обеспечение (вычислительные и управляющие устройства, средства получения (датчики), преобразования, хранения, отображения и регистрации информации, устройства передачи сигналов и исполнительные устройства);
- программное обеспечение — совокупность программ, необходимая для реализации функций АСУТП, заданного функционирования комплекса технических средств (КТС) и предполагаемого развития системы;
- информационное обеспечение, включающее информацию, характеризующую состояние АТК, системы классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации, массива данных и документов, необходимых для выполнения всех функций АСУТП, в том числе нормативно-справочную информацию;
- организационное обеспечение — совокупность описаний функциональной, технической и организационных структур, инструкции для оперативного персонала, обеспечивающих задание функционирования его в составе АТК;
- оперативный персонал;

- технологи-операторы, осуществляющие контроль над управлением ТООУ с использованием рекомендаций выработанных АСУТП;
- эксплуатационный персонал АСУТП.

Ремонтный персонал в состав АСУТП не входит.

1.3.2. SCADA-система в структуре автоматизированной системы управления

В соответствии с приведенным определением SCADA-система, показанная на рис. 1.3, входит в состав верхнего уровня АСУТП, и ее структура зависит от сложности выполняемой АСУТП задачи. На рис. 1.4 представлена общая структура технического обеспечения системы SCADA. Рассмотрим каждый компонент этой общей схемы SCADA-системы.

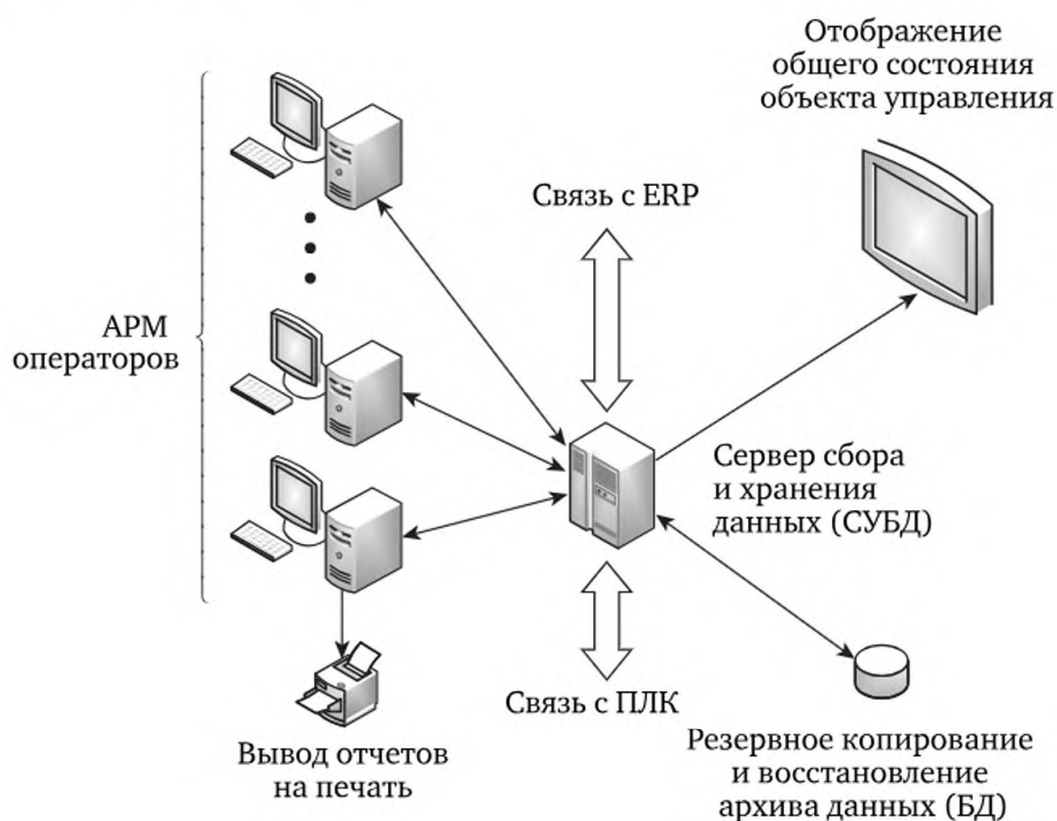


Рис. 1.4. Структура технического обеспечения системы SCADA

Автоматические рабочие места (АРМ) операторов служат для отображения информации о части системы, за которую отвечает оператор, и принятия управляющих команд от оператора. Передают принятые команды серверу для занесения в архив и последующей передачи программируемым контроллерам.

Как показано на рис. 1.4, обычно в качестве АРМ выступают ЭВМ. На данный момент все чаще здесь применяются обычные персональные компьютеры, но могут также использоваться специали-

зированные ЭВМ. Программное обеспечение этих ЭВМ должно обеспечивать так называемый НМІ, т. е. осуществлять связь оператора с объектом управления. Интерфейс принятия команд здесь чаще всего реализован с помощью клавиатуры и мыши, но иногда — посредством сенсорного управления.

Вывод отчетов на печать — там, где это необходимо, АРМ должны предусматривать возможность вывода отчетов, например при организации отдельных АРМ для экспертного (статистического) анализа системы. В случае отсутствия прямой связи с ERP или отсутствия ERP как такового также необходимо АРМ для создания и печати различных отчетов (от ежедневных, до годовых).

Отображение общего состояния объекта управления может быть необходимо для корректной оценки текущей ситуации операторами. Здесь применяются различные реализации:

- дисплей большой диагонали и разрешения;
- много дисплейные конфигурации, когда общая картина разделена между некоторым количеством дисплеев;
- специально изготовленная схема системы со световой или какой-либо еще индикацией текущего состояния.

Сервер сбора и хранения данных осуществляет сбор данных от ПЛК и их запись в архив. Обычно архив реализован средствами СУБД (Система Управления Базами Данных). Связь с ПЛК может осуществляться как по стандартным для ПК интерфейсам (Ethernet, RS232), так с помощью специализированных плат расширения или внешних устройств (FER — *Front End Processor*). Связь с ERP обычно осуществляется средствами локальной сети, в отдельных случаях могут использоваться глобальные сети.

Резервное копирование и восстановление архива данных необходимо для обеспечения надежности хранения информации. Может быть реализовано различными способами, как на внешние носители, так и на другие жесткие диски сервера.

Резервирование. Необходимо отметить, что в системе может требоваться горячее резервирование ее компонент. Обычно начинается оно с сервера СУБД, но может затрагивать все компоненты системы.

При построении верхнего уровня АСУТП могут быть задействованы не все компоненты, приведенные на рис. 1.4. В самом простом случае может быть задействован только один ПК, тогда он будет выполнять одновременно роль сервера и АРМ.

SCADA-система предоставляет программное обеспечение для создания и функционирования АРМ, связи с СУБД, создания отчетов и отображения общего состояния объекта управления. По сути, для отображения общего состояния используется те же средства, что и для АРМ, только здесь отображается система в целом и отсутствуют функции управления.

Детализация уровня ПЛК АСУТП зависит от сложности выполняемых задач. Рассмотрим общую схему одного сегмента сети на базе ПЛК, реализующего подсистему АСУТП, показанную на рис. 1.5.

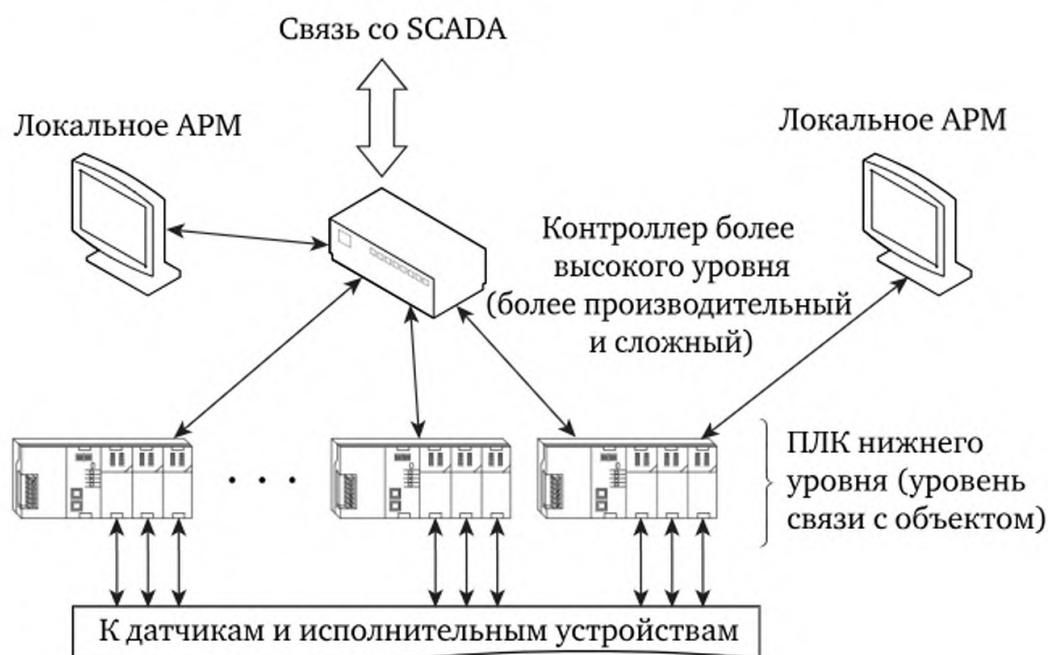


Рис. 1.5. Общая схема сегмента сети ПЛК

Изучим каждый указанный на схеме сегмента компонент более подробно:

Программируемый логический контроллер нижнего уровня непосредственно подключается к датчикам и исполнительным устройствам. Подключение может быть как напрямую, так и через связующие или преобразующие устройства. Например, для управления частотой вращения мощных электродвигателей необходимо использовать дополнительные схемы усилителей мощности, поскольку выходы контроллера могут быть не рассчитаны на требуемую мощность управления. Другой пример, когда датчики выдают электрический сигнал в диапазоне токов, отличном от диапазона работы входов контроллера, и требуется устройство преобразования. Иногда связующие устройства просто обеспечивают защиту входов/выходов контроллера от нештатных токов и напряжений.

На нижнем уровне обычно используются простые и дешевые контроллеры, целью которых является получение информации от датчиков, преобразование ее в вид, удобный для передачи по цифровому каналу, и обеспечение этой передачи. Для таких контроллеров часто применяется термин RTU — *Remote Terminal Unit* (удаленный терминал). В настоящее время многие датчики уже снабжены этими функциями и готовы передавать результаты измерения по цифровым каналам, используя стандартные протоколы (например,

Modbus). Это достигается за счет использования в этих датчиках микропроцессоров, а сами датчики так и называют «микропроцессорные». В связи с этим все чаще в АСУТП на этом уровне контроллеры замещаются микропроцессорными датчиками.

Контроллер более высокого уровня собирает и обрабатывает информацию от контроллеров более низкого уровня. Информация после обработки передается на верхний уровень. Здесь важно отметить, что на верхний уровень передается уже не вся полученная информация, а только необходимая. Например, может осуществляться передача по изменению показаний датчиков и (или) с определенной периодичностью и т. д. Именно в этом заключается функция обработки информации. Также данный контроллер передает управляющие команды от верхнего уровня, но может сам автоматически вырабатывать управляющие команды, если это предусмотрено в его программе. Например, он может осуществлять автоматическое управление согласно типовым законам регулирования: пропорциональному (П), интегральному (И), пропорционально-интегральному (ПИ), пропорционально-дифференциальному (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) или автоматически осуществлять аварийные остановки/отключение оборудования.

Локальные АРМ предназначены для непосредственного управления каким-либо локальным объектом. Обычно они играют роль локального пульта управления. Чаще всего их изготавливают в виде пультов с ламповой или светодиодной индикацией и кнопочным управлением. Но они могут быть представлены и обычными ПК или ПК с сенсорным интерфейсом в пыле/влагозащищенном корпусе. Особенность этих АРМ в том, что они получают информацию непосредственно с ПЛК, а не из архива, расположенного на сервере. Однако все команды управления с этих АРМ также должны фиксироваться в архиве на верхнем уровне.

На рис. 1.5 представлен сегмент сети ПЛК. Вся сеть целиком может быть гораздо более сложной, и вид ее зависит от объекта автоматизации. Сами сегменты могут иметь и более сложную структуру, например, уровней иерархии ПЛК может быть больше двух. Однако следует отметить, что обычно используются простые решения — информация с датчиков (в том числе и с микропроцессорных датчиков) собирается и обрабатывается одним ПЛК и далее передается серверу для занесения в архив.

1.3.3. ERP-системы в составе автоматизированной системы управления предприятием

Как отмечалось выше, структура АСУП совместно со SCADA-системой обеспечивает управление документооборотом предприятия. Для ее функционирования чаще всего используется ПО в виде систем ERP.

«ERP — *Enterprise Resource Planning*» — планирование ресурсов предприятия, специализированный пакет ПО, ориентированный на организацию управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами.

Концепция ERP сформулирована в 1990 г. Наиболее известные разработки принадлежат компаниям:

- *Oracle* — американская корпорация, крупнейший в мире разработчик ПО для организаций;
- *SAP* — немецкая компания, известный производитель ПО.

В 2000-е гг. появилось значительное количество ERP-систем для малого и среднего бизнеса, наиболее известными поставщиками которых стали:

- *Sage Group* — британская компания, разработчик программных решений в области управления предприятиями;
- *Microsoft*.

Модульный принцип организации позволяет внедрять ERP-системы поэтапно, вводя в эксплуатацию один или несколько функциональных модулей на каждом этапе, а также выбирать потребителю только те из модулей, которые актуальны для него. Допускается также использование модулей из разных ERP-систем.

Примером отечественных разработок в этой области могут служить программные продукты компании *Adastra*, модульный пакет для ERP, выпускаемый под торговой маркой T-FACTORY.exe™, и SCADA-система, выпускаемая под торговой маркой TRACE MODE®.

Уровень технического и программного обеспечения ERP-систем далее в курсе рассматриваться не будет, поскольку он тесно связан с экономическими и управленческими дисциплинами.

1.3.4. Особенности построения автоматизированной системы научных исследований

Основная цель создания АСНИ — получение новой информации об объекте, состоящей в установлении или уточнении математического описания объекта, либо в определении параметров математической модели объекта автоматизации.

Отсюда вытекают следующие особенности проектирования АСНИ:

- подобные системы создаются в условиях дефицита информации о свойствах изучаемого объекта, поскольку для получения такого рода информации они и предназначены;
- методика научных исследований может меняться в процессе изучения объекта;
- сам объект исследования характеризуется высокой степенью эволюционности, т. е. может изменяться исследователем в процессе его изучения.

Иными словами, характер экспериментов видоизменяется, объем исследований растет, сложность экспериментальных задач, как правило, нарастает.

Перечисленные особенности научных экспериментов приводят к тому, что практически всегда в ходе эксплуатации АСНИ возникают потребности в изменении некоторых ее характеристик с учетом полученной уже информации о свойствах объекта. При этом используется уникальная исследовательская аппаратура, время создания которой значительно, может морально устареть в ходе проведения исследований.

Перечисленные особенности позволяют сформулировать основное требование к АСНИ — гибкость системы. Указанное требование означает:

- 1) система должна допускать простую замену одних элементов другими с требуемыми техническими характеристиками или новым функциональным назначением;
- 2) система должна иметь возможность расширения, т. е. простого добавления недостающих технических средств к уже имеющимся, и включения их в систему;
- 3) система должна иметь возможность гибкой перестройки алгоритмов и методики экспериментальных исследований.

При выполнении указанных требований стоимость системы должна оставаться в приемлемых пределах. Указанные требования к АСНИ не противоречат требованиям, предъявляемым к АСУТП.

1.4. Основные этапы и тенденции развития технических средств автоматизированных систем управления и систем автоматического управления

Исторически укрупненно можно выделить три последовательно наступавших этапа развития технических средств АСУ и САУ.

Первый этап уместно связать с успехами в генерировании и использовании электрической энергии, начиная со второй половины XIX в. Этот этап знаменуется созданием электрических двигателей, трансформаторов, изобретением телефона и телеграфа, строительством протяженных линий связи. Появление этих устройств вызвало необходимость в создании различной коммутационной аппаратуры, автоматических выключателей и других средств защиты электрических цепей, а также датчиков электрических и неэлектрических величин с электрическим выходом.

Второй этап следует отнести к началу 1930-х гг., когда в промышленность и военное дело стали внедряться САУ. К этому времени в теории автоматического управления были получены фундаментальные

результаты, позволившие синтезировать устойчивые САУ с требуемыми точностными характеристиками и качеством переходных процессов. В это время в САУ стали использовать электромеханические сравнивающие устройства на сельсинах или потенциометрах, электромашинные усилители мощности (ЭМУ) и исполнительные двигатели постоянного тока. В дальнейшем с развитием магнитной техники и электроники ЭМУ были вытеснены магнитными усилителями, ламповыми, а затем полупроводниковыми. Стали более совершенными измерители рассогласования, и в качестве исполнительных двигателей появились двухфазные асинхронные и шаговые двигатели.

Третий этап приблизительно относится к середине 1970-х гг., когда развитие микросхемотехники привело к созданию больших интегральных схем. Это обеспечило резкое уменьшение габаритов и увеличило производительность ЭВМ. В результате появляются управляющие ЭВМ и контроллеры, которые позволяют создавать современные АСУ. Прогресс в совершенствовании больших и малых контроллеров для разных целей не прекращается и в нынешнее время. Применение контроллеров в сочетании с силовыми IGBT транзисторами позволило, например, в 1990-е гг. создать частотные преобразователи (инверторы) для эффективного управления мощными трехфазными синхронными и асинхронными двигателями. Эти двигатели повсеместно вытесняют из состава САУ менее надежные и дорогостоящие двигатели постоянного тока.

На всех этапах непрерывно продолжают совершенствоваться хорошо известные типы датчиков, и одновременно с появлением новых материалов появляются новые их типы. Как правило, физические явления, используемые в датчиках для преобразования неэлектрических величин в электрические, оказываются давно известными. Однако датчики на их основе для практического применения долгое время не удаётся создать в силу ряда причин (низкая чувствительность, габариты, диапазон измеряемой величины, стабильность показаний и т. д.). Например, эффект Холла наблюдается во многих материалах, но промышленные датчики на основе этого явления стали создаваться с появлением полупроводниковых материалов. Это же относится к новым типам датчиков для измерения температуры, фотоприемникам и пр.

Во все времена развитие элементной базы для создания АСУ и САУ идет одновременно по нескольким направлениям:

- совершенствование существующих и создание новых типов датчиков;
- повышение быстродействия, мощности, КПД, надежности, сокращение габаритов и создание новых типов исполнительных двигателей;
- развитие силовой и преобразовательной электроники;
- развитие управляющей вычислительной техники (скорость и объемы вычислений, объемы ЗУ, уменьшение габаритов).

1.5. Принципы подбора технических средств проектируемой системы в соответствии с техническим заданием

1.5.1. Разработка технического задания на проектируемую систему

Грамотно составленное ТЗ на проектируемую систему является определяющим фактором при выборе и согласовании друг с другом технических средств в процессе ее реализации. Непосредственно выбор технических средств чаще всего идет последовательно по определенной схеме в процессе проектирования системы. Будем рассматривать этот процесс в данном курсе, используя сквозной пример выбора, расчетов и согласования элементов угловой следящей системы. Сквозной пример начнем здесь, и он продолжится в теме 3 (п. 3.4—3.6). В остальных темах также даются примеры по обоснованию выбора, тестированию и согласованию соответствующих технических средств.

Рассмотрим далее процесс выбора и согласования друг с другом элементов (технических средств) угловой следящей системы.

В структуре САУ, показанной на рис. 1.1, б, входному сигналу X угловой следящей системы соответствует угол поворота входного вала (вал или штурвал оператора), а выходному сигналу Z — угол поворота выходного вала (вала нагрузки). Подобная следящая система (силовая) работает как усилитель мощности с единичной отрицательной обратной связью. Подобные следящие системы могут быть классифицированы по следующим признакам:

- 1) по области применения:
 - наземные,
 - корабельные,
 - бортовые,
 - промышленные;
- 2) по характеру передаваемого сигнала:
 - непрерывные (аналоговые),
 - с использованием модулированных сигналов,
 - импульсные,
 - релейные,
 - цифровые;
- 3) по принципу действия:
 - позиционные,
 - скоростные,
 - комбинированные;
- 4) по типу исполнительного двигателя:
 - с электрическим двигателем,
 - с гидравлическим двигателем,
 - с пневматическим двигателем.

Предлагаемая классификация позволяет уяснить смысл положений ТЗ для проектирования угловой следящей системы, задающих ряд требований к конструкции проектируемой системы, условиям и ограничениям на ее функционирование, таких как:

- 1) параметры нагрузки (момент инерции и внешние механические моменты на валу нагрузки);
- 2) требования на режимы работы вала нагрузки;
- 3) ошибки (погрешности) при отработке типовых воздействий;
- 4) качество переходных процессов;
- 5) требования к исполнительному двигателю;
- 6) дополнительные условия (условия эксплуатации системы, источник питающего напряжения, вес, габариты, конструкция силового редуктора и т. д.).

Анализ представленных требований уже на стадии формирования ТЗ позволяет ограничить круг допускаемых к применению в проектируемой системе типов элементов, таких как исполнительные двигатели, устройства измерения сигнала рассогласования, датчики угловой скорости и т. д. В самом деле, при наличии питающей сети 36 В, частотой 400 Гц и относительно невысокой требуемой выходной мощности системы целесообразно предварительно выбрать в качестве исполнительного двигателя двухфазный асинхронный.

Аналогичные рассуждения можно провести и для устройств измерения рассогласования и других устройств проектируемой системы. Естественно, что в процессе проектирования предварительные наброски по выбору конкретных типов технических устройств могут быть пересмотрены (по согласованию с заказчиком системы). В любом случае следует понимать, что заказчик всегда стремится минимизировать стоимость проектируемой системы при безусловном обеспечении всех закладываемых в ТЗ требований по ее техническим характеристикам.

В данном курсе мы опускаем экономические аспекты при формировании ТЗ на проектируемую систему, а воспользуемся в качестве ТЗ вариантом типового задания при курсовом проектировании угловой следящей системы. Прежде чем приступить к анализу варианта задания на проектируемую систему, напомним часто используемые необходимые базовые физические величины и соотношения для описания работы электромеханических средств САУ.

1.5.2. Базовые физические величины и соотношения для описания работы электромеханических средств систем автоматического управления

Обширная техническая литература, посвященная электромеханическим средствам САУ и изданная в разные годы, содержит глубокие и всесторонне изложенные материалы по изучаемым вопросам. Эти материалы с течением времени в основном не подвергаются

ревизии, а лишь дополняются новыми устройствами, появляющимися в связи с развитием техники. Правда, это развитие идет далеко не столь стремительными темпами по сравнению с техникой информационных технологий. Вместе с тем так исторически сложилось, что в указанной литературе, к сожалению, отсутствует строгая ориентация на применение Международной системы физических единиц СИ. Это приводит к разному в представлении основных соотношений и зависимостей и затрудняет пользование подобными источниками. В связи с этим ниже приводится список основных физических единиц, их обозначений и размерностей, которых мы будем придерживаться в данном курсе:

- время — секунда, с;
- длина l , м;
- линейная скорость v , м/с;
- угловая скорость ω , 1/с;
- угловое ускорение ϵ , 1/с²;
- масса m , кг;
- сила f , Н;
- момент M , Н · м;
- момент инерции J , кг · м²;
- напряжение U , В;
- ток I , А;
- сопротивление R , Ом;
- индуктивность L , Гн;
- мощность (электрическая и механическая) $P = UI = M\omega$, Вт.

Отдельно приведем определения магнитных величин, их обозначения и размерности:

- магнитный поток Φ — общее количество магнитных силовых линий, проходящих через данное сечение площадью s , Тл · м²;
- индукция магнитного поля B — магнитный поток Φ через единицу площади s , т. е. $B = \frac{\Phi}{s}$, Тл;
- магнитодвижущая сила (МДС) — сумма произведений всех i -х токов на число витков i -х обмоток, намотанных на данный сердечник, $\sum_{i=1}^n (I_i w_i)$, А;
- напряженность магнитного поля H — это МДС, отнесенная к средней длине магнитной силовой линии (векторная величина) $\frac{\text{МДС}}{l}$, А/м.

Приведем основные законы, связывающие магнитные, электрические и механические величины.

1. *Закон электромагнитной индукции.* В замкнутом контуре наводится ЭДС e , пропорциональная скорости изменения потокосцепления Φ , взятая с обратным знаком $e = -d\Phi/dt$. Непосредственно

из этого закона вытекает важный результат, позволяющий определить наводимую ЭДС e на концах проводника длиной l , движущегося со скоростью v перпендикулярно силовым линиям магнитного поля с индукцией B ($E = lvB$). Направление ЭДС определяется по правилу правой руки.

2. *Закон Ампера*. На проводник с током i и длиной l , помещенный в магнитное поле с индукцией B перпендикулярно силовым линиям этого поля, действует электромагнитная сила $F = liB$. Направление этой электромагнитной силы определяется по правилу левой руки.

3. *Закон полного тока*, закладываемый в определение МДС. Для катушки с током i и числом витков w , надетой на ферромагнитный сердечник длиной l , напряженность магнитного поля определяется как $H = iw/l$. Здесь произведение iw носит название магнитодвижущей силы. Для нескольких катушек на одном сердечнике с разными токами и числами витков напряженность магнитного поля H определяется алгебраической суммой МДС всех катушек.

Напряженность магнитного поля H и магнитная индукция B связаны между собой через магнитную проницаемость $\mu = B/H$. Магнитная проницаемость μ является важной характеристикой материалов, используемых в электромеханических устройствах СА и САУ. Как правило, используются материалы на основе трех металлов (ферромагнетиков — железа, никеля, кобальта) или их сплавов. Магнитная проницаемость этих материалов на много порядков превышает магнитную проницаемость любого другого материала и порой рассматривается для магнитных цепей в качестве аналога электрической проводимости. Соответственно понятие магнитного сопротивления по определению оказывается обратной величиной магнитной проницаемости, умноженной на среднюю длину магнитной силовой линии в замкнутом магнитопроводе.

Важной характеристикой ферромагнитных магнитопроводов (сердечников) является их петля гистерезиса. На рис. 1.6 представлены два варианта такой петли: *а* — петля, близкая к прямоугольной петле гистерезиса (ППГ) и *б* — узкая ПГ.

В соответствии с обозначениями рис. 1.6: вариант *а* — петля, близкая к прямоугольной петле гистерезиса (ППГ), т. е. $\frac{B_r}{B_s} \rightarrow 1$; *б* — узкая ПГ, т. е. $\frac{B_r}{B_s} \rightarrow 0$.

Различные устройства автоматики, содержащие элементы с ППГ, чаще всего представляют собой постоянные магниты, элементы запоминающих устройств и пр. Магнитопроводы с узкой ПГ находят самое широкое применение в электромеханике. Чем уже ПГ, тем меньше потери энергии при перемагничивании магнитопровода во время работы электрических машин.

Для изготовления магнитопроводов с узкой ПГ обычно используются специальные малоуглеродистые стали в виде тонких пластин, из которых путем спекания и последующей механической обработки получают магнитопроводы требуемой конфигурации.

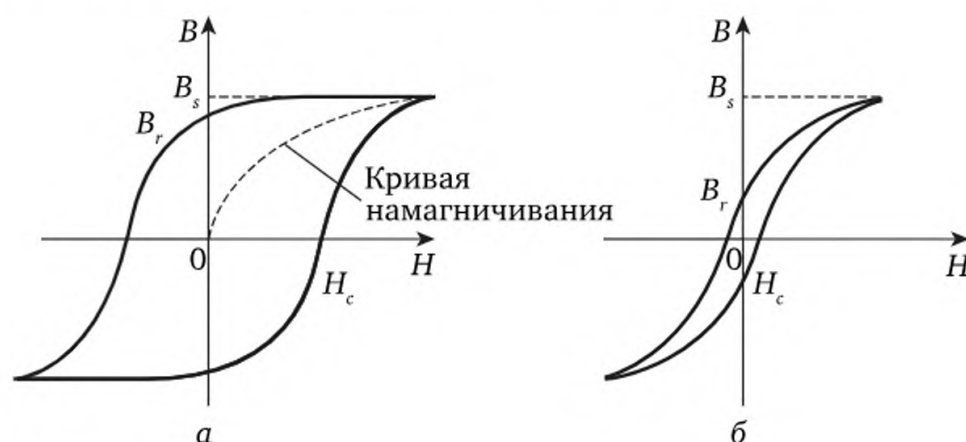


Рис. 1.6. Виды петель гистерезиса ферромагнитных магнитопроводов:

a — близкая к прямоугольной — ППГ; *б* — узкая ПГ;
 H_c — коэрцитивная сила; B_s — индукция насыщения;
 B_r — остаточная индукция

1.5.3. Пример задания на проектирование угловой следящей системы и основные этапы проектирования

В табл. 1.1 дан пример задания предельных параметров движения нагрузки, параметры самой нагрузки и основные параметры, характеризующие качество работы проектируемой системы.

Таблица 1.1

Вариант задания на проектируемую систему

$\omega_{\text{нм}}, 1/\text{с}$	$\varepsilon_{\text{нм}}, 1/\text{с}^2$	$M_{\text{нс}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$J_{\text{н}} \cdot 10^{-3}, (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$	$t_{\text{р}}, \text{с}$	$\sigma\%$	$\theta_{\text{ск}}, \text{град}$	$\theta_{\text{д}}, \text{град}$
2,58	48,4	0,267	3,43	0,1	15	1,5	2

В табл. 1.1 представлены:

- $\omega_{\text{нм}}$ — наибольшая скорость вращения исполнительного вала при равномерной заводке (вращении) и амплитуда скорости при синусной заводке;
- $\varepsilon_{\text{нм}}$ — амплитуда ускорения исполнительного вала при синусной заводке;
- $M_{\text{нс}}$ — статический момент сухого трения на валу нагрузки;
- $J_{\text{н}}$ — момент инерции нагрузки;
- $t_{\text{р}}$ — длительность переходного процесса при отработке системой скачка по углу на входе;
- $\sigma\%$ — максимальная величина перерегулирования $< 15\%$ при отработке системой скачка по углу на входе;

- $\theta_{\text{ск}}$ — сумма статической и кинетической погрешностей при равномерном вращении (заводке) вала нагрузки со скоростью $\omega_{\text{нм}}$;
- $\theta_{\text{д}}$ — динамическая погрешность при синусной заводке при амплитудных значениях скорости $\omega_{\text{нм}}$ и ускорения $\epsilon_{\text{нм}}$ вала нагрузки.

Более подробно можно ознакомиться с работой САУ при типовых входных сигналах (скачок, равномерная и синусоидальная заводка) в учебниках по теории автоматического управления в разделах «Линейные САУ», поэтому в данном курсе этот вопрос специально не раскрывается.

Помимо указанных в табл. 1.1 основных требований к параметрам и движению нагрузки, а также к качеству работы проектируемой системы при отработке типовых входных воздействий, дополнительно рекомендуется:

- применение многоступенчатого силового редуктора с цилиндрическими колесами (КПД одной ступени не выше $\eta_{\text{ip}} = 0,97$, а КПД всего редуктора при предварительных расчетах — не более $\eta_{\text{p}} = 0,8$);
- выбирать исполнительный двигатель из серии двигателей ЭМ-М, $f = 400$ Гц;
- усилитель мощности (УМ) — двухтактный транзисторный усилитель в классе В;
- устройство измерения рассогласования (ИУ) реализуется на бесконтактных сельсинах БД-160А и БС-155А в трансформаторном режиме, $f = 400$ Гц, $K_{\text{и}} = 40$ В/рад;
- тахогенератор — ТГ-5А, $f = 400$ Гц, $K_{\text{тг}} = 1,17 \cdot 10^{-2}$ В · с/рад, $J_{\text{тг}} = 10^{-7}$ кг · м² для реализации корректирующей обратной связи.

Рассмотрим основные этапы проектирование следящей системы и связанные с ними последовательность выбора элементов системы и расчета согласующих устройств. Эти этапы и очередность их прохождения показаны на рис. 1.7, где представлена функциональная схема угловой следящей системы.

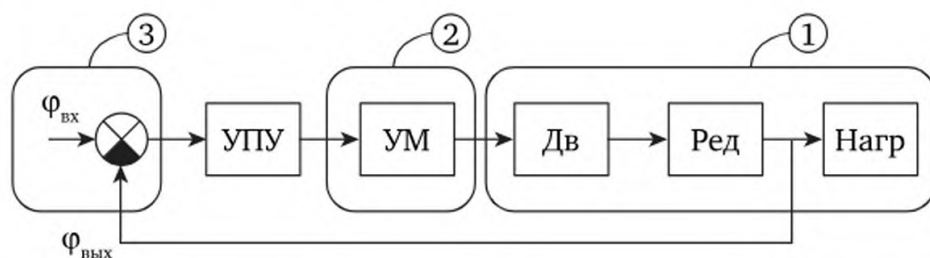


Рис. 1.7. Функциональная схема угловой следящей системы и очередность этапов ее проектирования

Первый этап — выбор двигателя и расчет редуктора, в свою очередь, состоит из ряда этапов:

- предварительный выбор двигателя и оценка передаточного числа редуктора;

- расчет редуктора;
- проверка пригодности двигателя с редуктором.

Второй этап — расчет усилителя мощности.

Третий этап — выбор измерительного устройства (класс точности) и оценка передаточной функции разомкнутой системы.

Четвертый этап — синтез корректирующих связей и расчет усилительно-преобразовательного устройства (УПУ).

Пятый этап — изготовление макетного образца системы и проверка качества его работы на соответствие требованиям ТЗ. Перед изготовлением макетного образца весьма полезным является моделирование системы в среде MATLAB (Simulink) с проверкой всех режимов и учетом влияния нелинейностей в структуре, которые не учитывались при проектировании линеаризованного варианта системы.

Если макетный образец удовлетворяет не всем требованиям ТЗ, то приходится пересматривать отдельные этапы проектирования, а в некоторых случаях проектировать систему вновь.

Фактически проектирование любой САУ начинается от нагрузки и идет в сторону входа системы.

В теме 3 мы будем рассматривать последовательное прохождение первых трех этапов проектирования следящей системы, связанных с непосредственным выбором исполнительного двигателя с учетом силового редуктора, расчетом усилителя мощности для нее и выбором элементов устройства измерения рассогласования.

Тема 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Виды датчиков с электрическим выходом

Автоматизация различных технологических процессов, эффективное управление различными агрегатами, машинами, механизмами требуют многочисленных измерений состояния элементов и комплексов технических устройств, входящих в структуру АСУ. Для получения информации об их состоянии используют датчики.

Понятие «датчик» естественно ассоциируется с техникой измерений. Обобщенный термин «датчик» укрепился в связи с развитием САУ, как элемент цепочки «датчик — устройство управления — исполнительное устройство — объект управления». В качестве отдельной категории использования датчиков в системах автоматической регистрации параметров можно выделить их применение в системах автоматизации научных исследований и экспериментов.

В литературе встречаются различные определения *датчиков*:

- чувствительный элемент, преобразующий параметры среды в пригодный для технического использования сигнал, обычно электрический, хотя возможно и иной по природе, например — пневматический сигнал;
- законченное изделие на основе указанного выше элемента, включающее, в зависимости от потребности, устройства усиления сигнала, линеаризации, калибровки, аналого-цифрового преобразования и интерфейса для интеграции в системы управления. В этом случае чувствительный элемент датчика часто носит название сенсор;
- датчиком называется часть измерительной или управляющей системы, представляющая собой конструктивную совокупность измерительных преобразователей, включающую преобразователь вида энергии сигнала;
- датчик — конструктивно обособленная часть измерительной системы, содержащая один или несколько первичных преобразователей.

Эти определения соответствуют практике использования термина производителями датчиков. В первом случае датчик — это

небольшое, обычно монолитное устройство электронной техники, например терморезистор, фотодиод и т. п., которое используется для создания более сложных электронных приборов. Во втором случае — законченный по своей функциональности прибор, подключаемый по одному из известных интерфейсов к системе автоматического управления или регистрации, например фотодиоды в матрицах (фото) и др. В третьем и четвертом определении акцент делается на том, что датчик является конструктивно обособленной частью измерительной системы, воспринимающей информацию.

Датчики (в литературе также их называют измерительными преобразователями или сенсорами) являются элементами систем автоматизации, с помощью которых получают информацию о состоянии системы управления. В САУ сигнал от датчика подается на устройство сравнения с заданным сигналом (уставкой), разность этих сигналов подается на усилитель, а усиленный сигнал действует на исполнительный орган, изменяющий состояние регулируемого объекта.

Как уже отмечалось, датчик преобразует входную величину в выходной сигнал, более удобный для дальнейшего движения информации. «Преобразователь» — термин более общий, так как любой элемент автоматики, имея вход и выход, является преобразователем. В простейших случаях датчик осуществляет только одно преобразование. Например, температуру в ЭДС (в термопарах) или перемещение — в изменение параметров электрической цепи (индуктивные датчики). Однако в ряде случаев делается не одно преобразование, а осуществляется функциональное преобразование $y = Z(f(x))$.

Датчики являются важнейшим узлом систем автоматики, так как их неточность влияет на работу системы в целом. В реальных условиях датчики находятся в местах с более агрессивной внешней средой, чем остальные узлы систем автоматики, и их практически невозможно защитить от воздействия высоких температур, вибрации, экстремальных моментов и сил, а также других факторов. На работу датчиков также могут влиять всевозможные сигналы случайного характера, так называемые измерительные шумы. Учитывая вышеприведенные обстоятельства, к датчикам предъявляются следующие, достаточно высокие технические требования:

- 1) зависимость между величинами на входе и выходе должна быть однозначной, т. е. гистерезис характеристик должен быть минимальным или отсутствовать;
- 2) высокая селективность — выход датчика должен зависеть только от измеряемого входа, а не от посторонних сигналов или измерительных шумов;
- 3) величина на выходе должна зависеть от входной величины линейно, т. е. датчик должен иметь линейную характеристику;
- 4) датчик должен иметь достаточную чувствительность и стабильные во времени характеристики. Чувствительность s выража-

ется как $s = dY/dX$, где dY , dX — приращения выходной величины датчика Y и измеряемой величины X ;

5) сигналы датчика должны действовать в направлении от входа к выходу, влияние нагрузки на работу датчика должно быть минимальным или отсутствовать;

6) датчик должен иметь высокое быстродействие;

7) датчик должен быть устойчивым к воздействиям внешней среды.

Классификация датчиков. Датчики можно классифицировать по различным признакам. Одной из таких возможностей является их разделение по входным и выходным величинам. При этом наибольший интерес представляют датчики механических, термических, оптических и электромагнитных величин с электрическим выходом, представленные в табл. 2.1.

Приведенные в табл. 2.1 датчики с электрическим выходом имеют ряд преимуществ перед другими. Электрические величины легко преобразовывать и передавать на расстояние с большой скоростью. Их можно преобразовывать в цифровой код. По принципу действия различают датчики генераторные и параметрические, а также:

- оптические датчики (фотодатчики);
- ультразвуковые и струнные датчики;
- пьезоэлектрические и тензодатчики;
- индуктивные и трансформаторные датчики;
- емкостные датчики;
- магнитоэлектрические на основе эффекта Холла;
- тепловые датчики.

Ниже будут рассмотрены наиболее распространенные типы датчиков. При этом основное внимание уделяется принципам построения датчиков того или иного вида, их достоинствам и недостаткам, областям применения. Более детальное описание датчиков и их характеристики приводится в соответствующей справочной литературе, к которой необходимо обращаться во всех случаях, связанных с построением конкретных систем управления.

2.2. Контактные и потенциометрические датчики

2.2.1. Контактные датчики

Контактные датчики — это вид датчиков сопротивления, которые преобразуют первичное перемещение элемента в изменение сопротивления электрической цепи. С помощью таких датчиков измеряют и контролируют усилия, перемещения, размеры объектов и т. п. К ним относятся:

- а) концевые выключатели;
- б) контактные термометры;
- в) электронные датчики.

Таблица 2.1

Классификация датчиков по входным и выходным параметрам

Выходные величины	Входные величины					
	механические			тепловые	оптические	электромагнитные
	движение — сдвиг, положение	скорость	ускорение, сила, давление, момент	температура	световой поток	электромагнитное поле
Активное сопротивление, $R(u) = \text{var}$	$R = \rho \frac{l}{s}$, где $l = f(x)$, $s = f(x)$	—	Тензоэффект $R = \rho \frac{l}{s}$. Закон Гука $x = kF$	Зависимость сопротивления металлов и полупроводников от температуры, сверхпроводимость	Зависимость сопротивления полупроводников от температуры (фотодиоды, фототранзисторы)	Гальвано-магнитный эффект $\rho = f(H)$ (варисторы)
Емкость, $C(u) = \text{var}$	$C = \frac{\varepsilon S}{l}$, где $l = f(x)$, $S = f(x)$	—	$\varepsilon = f(F)$, ε — диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon = f(\vartheta)$	—	Варикапы
Индуктивность, $L(u) = \text{var}$	$L = w^2 G$, $M = w_1 w_2 G$. Магнитная проводимость $G = \frac{\mu S}{l}$	—	$\mu = f(F)$, μ — магнитная проницаемость	$\mu = f(\vartheta)$	—	—
ЭДС, $E(u) = \text{var}$	Автотрансформатор, поворотный трансформатор, индукционный регулятор	Индукированная ЭДС — ЭДС Фарадея $E = Bvl$	Пьезоэлектрический эффект	ТермоЭДС (термопара)	Оптическая ЭДС полупроводников (солнечные батареи)	Эффект Холла

Контактные датчики работают как на постоянном, так и на переменном токе. Конструктивно контактные датчики могут быть однопредельными и многопредельными. Если измеряемая величина изменяется в значительных пределах, то используются многопредельные датчики. Примером контактных датчиков служит электромагнитное реле, в котором при достижении известного значения входной величины выходная изменяется скачком. Широкое распространение получили контактные датчики механических величин. Они служат, например, для выбраковки изделий («большее» или «меньшее»), преобразуя механическую величину в электрическую. Пример контактного датчика показан на рис. 2.1.

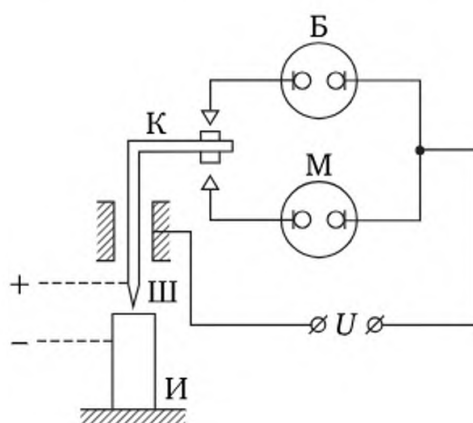


Рис. 2.1. Контактный датчик

Измерительный штифт, касаясь изделия, может зажечь лампочку с символом «Б» или «М».

Преимуществами контактных датчиков являются:

- предельная простота;
- широкое использование в системах автоматики.

Недостатки:

- сложность осуществления непрерывного контроля;
- ограниченный срок службы контактной группы.

2.2.2. Реостатные и потенциометрические датчики

Потенциометрические датчики — это приборы, действия которых основаны на изменении их активного сопротивления при изменении длины l , площади сечения S , удельного сопротивления ρ :

$$h = \rho \frac{l}{S}. \quad (2.1)$$

Реостатные датчики — это датчики, у которых меняется сопротивление при перемещении подвижного контакта. Подвижный контакт реостата механически связан с объектом, перемещение которого (линейное или угловое) нужно преобразовать. Поскольку

в перемещение могут быть преобразованы многие физические величины (давление, расход, уровень и др.), то реостаты фактически являются преобразователями неэлектрических величин в электрические.

Наибольшее распространение получила потенциометрическая схема включения реостатного датчика в виде делителя, работающая как на постоянном, так и на переменном токе. Вопросы использования потенциометров в составе САУ в качестве измерителей рассогласования рассмотрены в теме 3. Схема потенциометрического датчика показана на рис. 2.2. При перемещении движка выходное напряжение меняется пропорционально входной величине (H). Таким образом, осуществляется преобразование перемещения в напряжение.

Конструктивно потенциометрические датчики различают по способу изготовления сопротивления.

- а) ламельные с постоянным сопротивлением;
- б) проволочные с непрерывной обмоткой;
- в) с резистивным слоем.

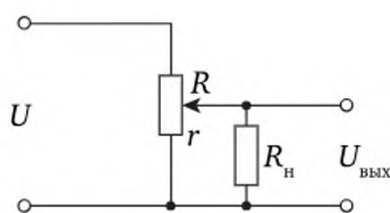


Рис. 2.2. Потенциометрический датчик

Ламельные датчики используют для проведения довольно грубых измерений. В них постоянные по номиналу резисторы припаиваются к ламеле, как показано на рис. 2.3. На ламеле чередуются проводящие и непроводящие слои, по которым скользит подвижный контакт. При его перемещении выходное напряжение такого делителя будет меняться дискретно.

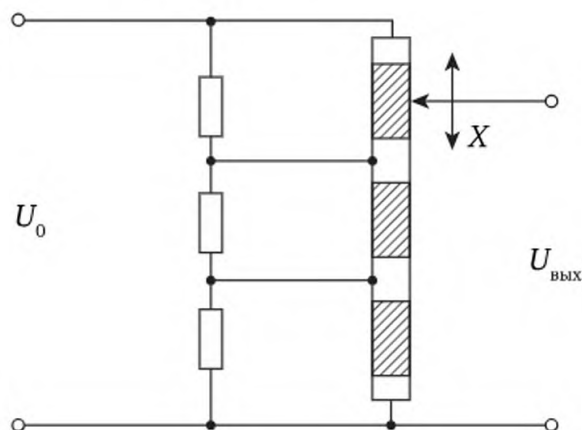


Рис. 2.3. Схема потенциометрического датчика на ламеле

Проволочные потенциометрические датчики содержат каркас из непроводящего материала, на который наматывается проволока с высоким удельным сопротивлением. Обычно это проволока из константана или манганина, а для высоких температур — железо- и никель-хромовые сплавы. Подвижные контакты выполняются из более мягкого материала, чтобы исключить истирание провода.

Если заменить проволоку резистивным слоем, то получим более дешевый датчик, мало отличающийся от предыдущего.

Статическая характеристика нереверсивного потенциометрического датчика имеет вид, показанный на рис. 2.4.

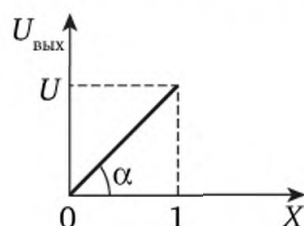


Рис. 2.4. Статическая характеристика нереверсивного потенциометрического датчика, $\alpha = \arctg K$

В режиме холостого хода статическая характеристика линейна

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{U}{R} \right) \cdot r,$$

где R — полное сопротивление обмотки; r — сопротивление части обмотки.

Учитывая, что $r/R = X/l$, где l — общая длина обмотки, получим

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{U}{l} \right) \cdot X = K \cdot X.$$

Поскольку датчик нереверсивный, то он не будет реагировать на изменение знака X . Существуют схемы, которые чувствительны к изменению знака X . Статическая характеристика такого датчика показана на рис. 2.5.

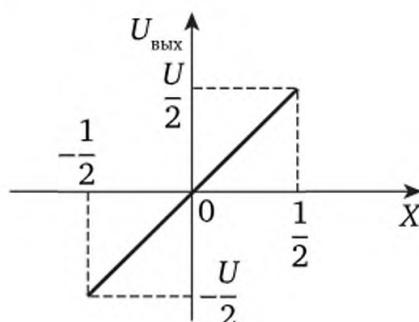


Рис. 2.5. Статическая характеристика реверсивного потенциометрического датчика

Реальная статическая характеристика может отличаться от идеальной. Погрешности реальной статической характеристики зависят от ряда факторов, среди которых следует отметить:

- 1) зону нечувствительности, зависящую от диаметра намоточного провода;
- 2) неравномерность статической характеристики из-за переменного диаметра намотанной проволоки, шага намотки;
- 3) погрешность от люфта подвижного контакта;
- 4) погрешность от вида нагрузки.

Достоинства потенциометрических датчиков:

- простота конструкции;
- малые габариты и вес;
- высокая степень линейности статических характеристик;
- возможность работать на переменном и постоянном токе.

Недостатки:

- наличие скользящего контакта, что может стать причиной отказа;
- погрешность в работе за счет нагрузки;
- небольшой коэффициент преобразования;
- высокий порог чувствительности;
- наличие высокочастотных шумов при перемещении контакта.

2.3. Тензометрические и пьезоэлектрические датчики

2.3.1. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики относятся к классу генераторных датчиков, в которых преобразуется измеряемый параметр непосредственно в электрический сигнал. Пьезоэлектрические датчики используют пьезоэлектрический эффект, возникающий в некоторых кристаллах (кварц, турмалин, сегнетова соль, титанит бария и др.) в зависимости от значения и характера прикладываемых к кристаллу возмущений. На стороне, противоположной приложенному возмущению, возникает электрический заряд. К этой стороне кристалла прикрепляют электроды для измерения заряда. Построенные таким образом пьезодатчики напоминают конденсатор, в котором диэлектриком являются сами кристаллы. Иными словами, работа кристалла напоминает работу генератора электрических зарядов, приводящих к появлению электрического напряжения на электродах. Интересно, что зарядка появляется только в местах приложенных возмущений, т. е. датчик обладает избирательностью.

Пьезоэлектрический эффект обладает обратным явлением. Если приложить к кристаллу напряжение, то это приведет к появлению механической деформации. Это явление широко применяется в разных типах пьезопреобразователей. *Пьезосенсоры* чувствительны

только к изменению внешних условий, т. е. эти устройства переменного тока. Поскольку пьезодатчик подобен электрическому конденсатору, то количество электричества q , появившееся из-за воздействия механического возмущения, заряжает грани пьезоэлемента до напряжения U , определяемое как $U = q/c$, где c — емкость между проводниками.

Чувствительность датчика S определяется как отношение приращения напряжения на выходе датчика U к приращению силы F . При параллельном соединении n пьезопластин их емкость складывается, а чувствительность датчика вычисляется по формуле

$$s = nK_0 / (C_{\text{вх}} + nC_0),$$

где n — количество пьезопластин; K_0 — пьезоэлектрический модуль материала пластины; $C_{\text{вх}}$ — емкость измерительной цепи; C_0 — емкость одной пластины.

Пьезоэлектрические элементы могут использоваться в форме одного кристалла либо многослойной структуры.

Особенностью пьезоэффекта является знаковая чувствительность, т. е. изменение знака заряда при растяжении или сжатии, а также при изменении направления поля.

Пьезодатчики позволяют решать задачи измерения давления, ускорения, массы, угловых скоростей, устройств для контроля состава, концентрации газов, влажности и т. д. Эти датчики по точности часто превосходят датчики, выполненные на других физических принципах.

Пьезодатчики можно разделить на два класса в зависимости от физического эффекта, лежащего в их основе. К первому классу относятся датчики, использующие прямой пьезоэффект. Они используются для измерения линейных и угловых скоростей, динамических и квазистатических давлений и усилий и др. Ко второму классу относятся, так называемые, резонансные пьезодатчики, в основе которых лежит обратный пьезоэффект. Кроме того, в основе пьезодатчиков могут лежать другие физические эффекты (тензочувствительность, термочувствительность, акусточувствительность), что позволяет использовать их для измерения статических и динамических давлений и усилий, концентрации газа, вязкости, углов наклона и др.

Наиболее перспективным материалом для изготовления пьезодатчиков является пьезокерамика, которая обладает многими достоинствами. Технология производства пьезокерамики проста, а потому удается снизить стоимость преобразователей на их основе. Высокая радиационная устойчивость пьезокерамических материалов позволяет успешно применять их в условиях повышенной радиации. Также следует отметить стойкость этих материалов к действию агрессивных сред.

К недостаткам пьезокерамики следует отнести низкую температурную устойчивость по сравнению с кварцем. Однако сейчас разработаны пьезокерамические элементы на основе кобальта, способные выдерживать температуру, равную 700 °С и более.

Пьезоэлектрические датчики позволяют измерять величины давлений в широком диапазоне, что важно при изготовлении динамометров.

Применение пьезокерамических элементов открывает широкие перспективы во всех направлениях науки и техники, особенно в области радиоэлектроники, устройств автоматики и вычислительной техники.

2.3.2. Тензометрические датчики

Тензодатчики — это устройства, предназначенные для измерения деформации объекта, исследования поведения объекта при воздействии на него механических возмущений. Если на механическую конструкцию действуют внешние силы, то она изменяет свою форму таким образом, чтобы противостоять воздействию этих сил. Эти изменения могут быть измерены.

Тензометрический датчик — это резистивный элемент, электрическое сопротивление которого изменяется при растяжении или сжатии.

Изменение сопротивления проводника тензодатчика можно объяснить двумя причинами:

- 1) изменением геометрических размеров проводника (длины или диаметра) в соответствии с формулой (2.1);
- 2) изменением удельного сопротивления материала тензодатчика.

Работа тензодатчика характеризуется коэффициентом тензочувствительности (по аналогии с чувствительностью емкостного датчика)

$$S = \frac{(\Delta R / R)}{(\Delta L / L)}, \quad (2.2)$$

где L и R — соответственно длина и сопротивление датчика при отсутствии возмущений.

Из формулы (2.2) очевидно, что коэффициент тензочувствительности — безразмерная величина. Она может быть как положительной (для материалов, у которых сопротивление увеличивается при растяжении), так и отрицательной (для материалов, у которых сопротивление уменьшается при растяжении).

Обычно сопротивление тензодатчика находится в пределах от десятка до тысячи Ом. Материалом для тензодатчиков служат нержавеющая или легированная сталь, а также алюминий.

Конструктивно тензодатчики выполняются наклеиваемыми и не наклеиваемыми.

Как указывалось выше, при действии силы растяжения или сжатия сопротивление тензодатчика изменяется, поэтому вводится понятие «тензорезистивного» и «тензометрического» датчиков. *Тензометрические датчики* — это более широкое понятие. Существуют различные способы измерения деформации: тензорезистивный, пьезорезистивный, оптико-поляризованный, волоконно-оптический, механический. Поэтому правильно называть все датчики для измерения деформации тензометрическими.

Тензорезистивный эффект, позволяющий фиксировать изменение сопротивления в твердых проводниках и полупроводниках при их сжатии или расширении, связан с деформационным воздействием на атомную структуру материала.

Современные тензодатчики обладают большим разнообразием конструкций: мостовой, шайбовый, сильфонный, одноточечный и колонный. По максимальной нагрузке различают тензодатчики массой от нескольких грамм до десятков и сотен тонн. Чувствительность тензодатчика определяется отношением изменения напряжения на датчике к единице нагрузки. Это изменение напряжения составляет обычно 1—3 мВ на каждый вольт питающего датчик напряжения.

Область применения тензодатчиков разнообразна — от промышленных конструкций до охранных и весовых систем. Широкое распространение тензодатчиков объясняется целым рядом причин, среди которых:

- малые габариты и вес;
- линейность характеристик;
- малая инерционность, что позволяет применять их как в статических, так и в динамических режимах.

К недостаткам стоит отнести температурную чувствительность.

Статическая характеристика тензодатчиков имеет линейный вид, т. е. чувствительность тензодатчиков практически постоянна.

2.4. Индуктивные и трансформаторные датчики

2.4.1. Индуктивные датчики

Индуктивные датчики служат для бесконтактного получения информации о перемещении рабочих органов машин, механизмов роботов и т. д. и преобразования этой информации в электрический сигнал. Принцип действия индуктивного датчика основан на изменении индуктивности обмотки на магнитопроводе в зависимости от положения отдельных элементов магнитопровода. Простейший индуктивный датчик показан на рис. 2.6.

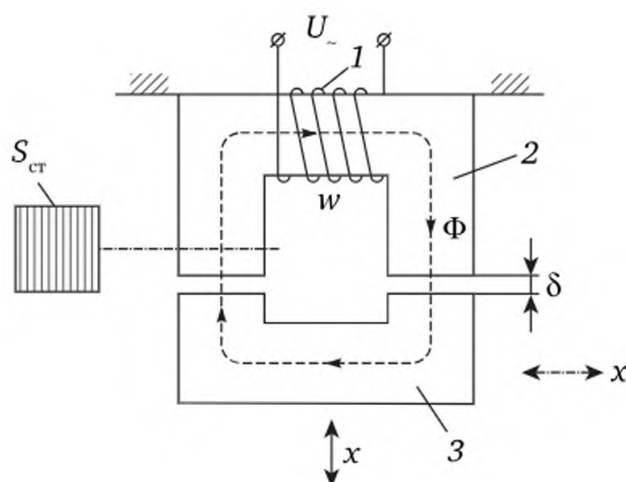


Рис. 2.6. Простейший индуктивный датчик

Такой датчик представляет собой катушку индуктивности 1 с железным сердечником 2 и якорем 3, отделенным от сердечника воздушным зазором. Катушка индуктивности с сердечником, называемая статором датчика, неподвижна. Якорь же механически соединен с подвижной частью объекта, перемещение которого нужно преобразовывать в электрический сигнал. Перемещение якоря изменяет сопротивление магнитной цепи из-за изменения воздушного зазора δ между статором и якорем при вертикальном движении якоря или площади воздушного зазора при горизонтальном движении.

На обмотку подается переменное напряжение. Значение тока, протекающего через обмотку, определяется как

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_H + r_d)^2 + (\omega L)^2}}, \quad (2.3)$$

где r_d — активное сопротивление обмотки; L — индуктивность датчика; R_H — внешнее сопротивление нагрузки (на рисунке не показано).

Поскольку активное сопротивление — величина постоянная, то изменение тока в формуле (2.3) может проходить за счет изменения индуктивной составляющей, которая зависит от величины зазора δ или сечения магнитопровода $S_{ст}$. Каждому значению зазора δ соответствует свое значение тока, создающее падение напряжения на R_H ($U = f(\delta)$).

Если пренебречь магнитным сопротивлением железа $R_{мж}$ (более развернутое толкование магнитного сопротивления дается в п. 1.5.2) по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора $R_{мв}$, то можно найти

$$U_{вых} = \frac{UR_H}{\sqrt{(R_H + r_d)^2 + \left(\frac{0,4 \cdot 10^{-8} \mu_0 S W^2 \omega}{2\delta} \right)^2}}. \quad (2.4)$$

Зависимость, показанная на рис. 2.7, имеет линейный характер в большом диапазоне изменения δ .

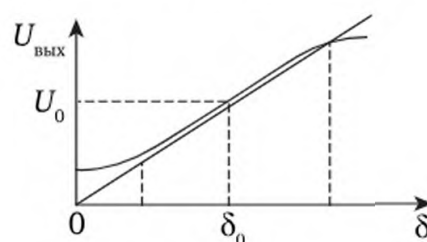


Рис. 2.7. Зависимость изменения напряжения на нагрузке от величины зазора

Отклонение от линейности в начале характеристики объясняется принятыми допущениями. Индуктивный датчик относится к классу параметрических. В целом рассмотренный индуктивный датчик имеет следующие недостатки:

- фаза тока не меняется при изменении направления перемещения и, чтобы обойти этот факт, нужно устанавливать начальный зазор, а следовательно — начальный ток;
- ток через нагрузку зависит от амплитуды и частоты питающего напряжения.

Разновидностью индуктивных датчиков является дифференциальный индуктивный датчик, состоящий из двух независимых датчиков (рис. 2.8).

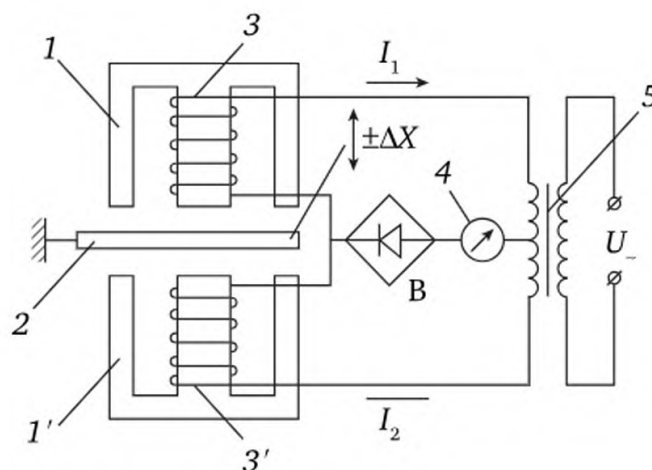


Рис. 2.8. Дифференциальный индуктивный датчик

Этот датчик состоит из двух магнитопроводов 1, 1' с катушками 3, 3' и общим якорем 2. Для питания дифференциальных индуктивных датчиков используется источник питания переменного тока на трансформаторе 5 со сдвоенной вторичной обмоткой. Средняя точка этой обмотки соединяется с общей точкой обмоток 3, 3' через прибор 4, регистрирующий ток в этой цепи, и нагрузку, расположенную в блоке В. В этом же блоке располагается демодулятор

(с его схемой и принципом работы можно ознакомиться в теме 4), подсоединенный к нагрузке. Демодулятор осуществляет преобразование модулированного по амплитуде переменного напряжения на нагрузке в аналоговый выходной сигнал датчика.

При среднем положении якоря 2, когда воздушные зазоры одинаковые, то индуктивные сопротивления катушек 3, 3' также одинаковые, ток в диагонали, измеряемый прибором 4, будет равным нулю. При отклонении якоря под действием контролируемой величины $I \neq 0$. Характеристика датчика относительно амплитудного значения тока через нагрузку имеет вид, показанный на рис. 2.9.

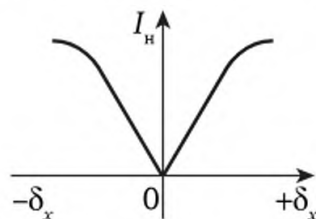


Рис. 2.9. Статическая характеристика дифференциального индуктивного датчика

Характеристика дифференциального датчика по току, как следует из рис. 2.9, не меняет полярность выходного тока при изменении полного сопротивления катушек. При использовании демодулятора, или, что то же самое, — фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ) удастся установить направление отклонения якоря. Характеристика реверсивного датчика с ФЧВ имеет вид, как на рис. 2.10.

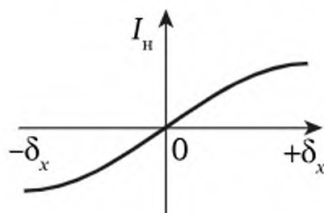


Рис. 2.10. Характеристика реверсивного датчика с ФЧВ

При использовании индуктивного датчика нужно обращать внимание на погрешность преобразования измеряемого параметра. Суммарная погрешность определяется суммой составляющих. При этом следует выделить следующие погрешности датчика:

- 1) от влияния внешних электромагнитных полей;
- 2) от нелинейности характеристик;
- 3) конструктивная;
- 4) технологическая и температурная;
- 5) от старения датчика.

Определяющей здесь является погрешность от нелинейности характеристик.

Достоинства индуктивных датчиков:

- простота и прочность конструкции, отсутствие скользящих контактов;
- возможность подключения к источникам промышленной частоты;
- высокая чувствительность;
- относительно большая выходная мощность.

Недостатки:

- точность зависит от стабильности частоты питающего напряжения;
- зависимость индуктивного сопротивления от частоты питающего напряжения;
- значительное обратное воздействие датчика на измеряемую величину (за счет притяжения датчика к сердечнику).

2.4.2. Трансформаторные датчики

Трансформаторные датчики являются разновидностью индуктивных датчиков. Такой датчик можно рассматривать как трансформатор, у которого коэффициент трансформации изменяется за счет изменения коэффициента взаимной индуктивности между обмотками. Такие датчики применяются для преобразования в электрический сигнал линейных и угловых перемещений объекта.

На рис. 2.11 представлен дифференциальный трансформаторный датчик с угловым перемещением якоря.

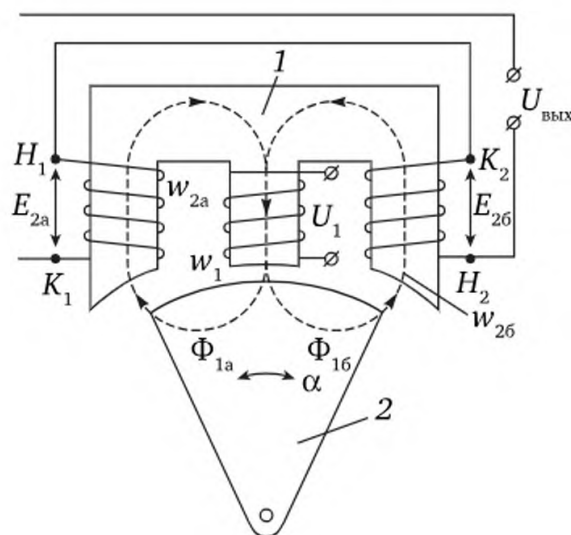


Рис. 2.11. Дифференциальный трансформаторный датчик угла

Первичная обмотка датчика W_1 расположена на центральном стержне и подключена к источнику U . Вторичные обмотки располагаются на крайних стержнях и подключаются последовательно и встречно. Магнитный поток Φ_1 разветвляется на два потока

и в случае симметричного расположения якоря по отношению к статору индуцированные ЭДС во вторичных обмотках — $E_{2б} = E_{2а}$.

Поскольку фазы напряжений этих обмоток противоположны, то напряжение на выходе датчика $U_{\text{вых}} = 0$. При повороте коря, который связан с объектом управления, изменяются потоки $\Phi_{2а}$ и $\Phi_{2б}$, а также изменяются $E_{2а}$ и $E_{2б}$, на выходе появляется выходное напряжение $U_{\text{вых}} = E_{2а} - E_{2б}$, и фаза его будет определяться фазой большей ЭДС.

Трансформаторный датчик для измерения линейных перемещений не отличается по принципу работы от рассмотренного выше датчика. Трансформаторные датчики отличаются от индуктивных отсутствием гальванической связи между цепью питания и выходной цепью. Погрешность трансформаторных датчиков определяется точностью исполнения геометрических размеров сердечника, колебаниями напряжения и частоты источника.

Достоинства трансформаторных датчиков:

- довольно высокая выходная мощность, что дает возможность обходиться без дополнительных усилителей;
- простота конструкции;
- высокая надежность;
- относительно малая стоимость.

Недостатки:

- трудность регулировки и компенсации начального напряжения на выходе;
- возможность работы только на переменном токе;
- ограниченный диапазон линейности статической характеристики.

2.5. Емкостные датчики

Принцип действия датчика основан на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его пластин(обкладок) и от диэлектрической проницаемости между ними.

Для двухобкладочного плоского конденсатора электрическая емкость определяется соотношением

$$C = L_0 n \frac{S}{l}, \quad (2.5)$$

где L_0 — диэлектрическая постоянная ($L_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); n — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; S — активная площадь обкладок; l — расстояние между обкладками конденсатора.

Емкостные датчики питаются переменным напряжением (обычно повышенной частоты). Зависимости $C(S)$ и $C(l)$ используют для

преобразования механических перемещений в изменение емкости конденсатора.

На рис. 2.12 показана схема емкостного датчика линейного перемещения и изменение его емкости в зависимости от l .

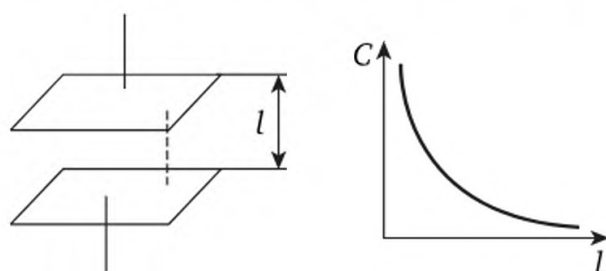


Рис. 2.12. Схема емкостного датчика линейного перемещения

В датчиках углового перемещения на рис. 2.13 емкость меняется из-за изменения площади взаимного перекрытия пластин.

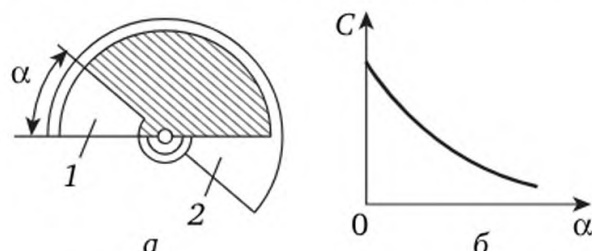


Рис. 2.13. Емкостный датчик углового перемещения

В качестве измерительных схем обычно применяют дифференциальные датчики, включаемые в мостовую измерительную схему (рис. 2.14).

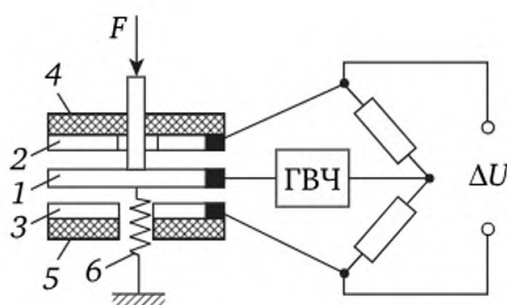


Рис. 2.14. Дифференциальный емкостный датчик в мостовой схеме

На металлическую обкладку 1 действует возмущение F . Обкладка закреплена на пружинной подвеске 6. При отсутствии возмущения F она занимает симметричное положение относительно двух неподвижных обкладок 2 и 3, изолированных от корпуса прокладками 4 и 5, и, следовательно, их емкости равны. При наличии возмущения емкости получают приращения разных знаков. Поскольку

эти емкости включены в смежные плечи мости, то чувствительность датчика увеличивается вдвое.

Питание моста осуществляется от генератора высокой частоты (ГВЧ) порядка нескольких килогерц. Напряжение ΔU зависит от приложенного возмущения и его направления (изменяется фаза).

Более высокую чувствительность можно получить в резонансных схемах включения емкостного датчика, показанного на рис. 2.15.

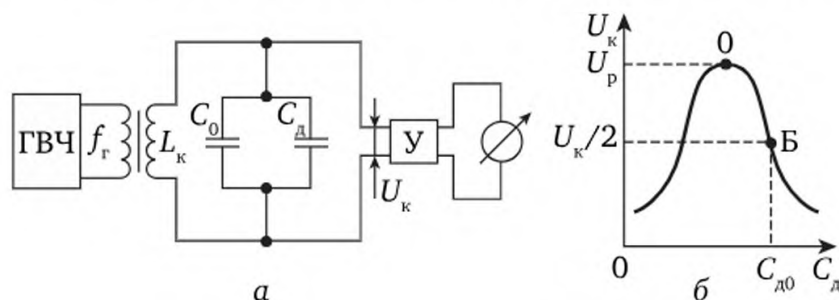


Рис. 2.15. Резонансная схема включения емкостного датчика

Генератор высокой частоты вырабатывает сигнал $f_г$ и питает колебательный контур, состоящий из емкостного датчика $C_д$, индуктивности $L_к$ и подстроечного конденсатора C_0 . Напряжение контура усиливается усилителем У и измеряется милливольтметром, шкала которого может быть проградуирована в единицах измеряемой величины.

Фиксируемое напряжение на резонансной частоте контура

$$f_г = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_к(C_0 + C_д)}}$$

будет тем больше, чем меньше активное сопротивление контура.

Возможные области применения емкостных датчиков разнообразны. Они широко используются в САУ различных производственных процессов, применяются для контроля уровня, как конечные выключатели на автоматизированных линиях, роботах и т. д. В настоящее время широкое распространение емкостные датчики получили в умных домах как датчики приближения или присутствия. Емкостные датчики линейных и угловых перемещений являются наиболее распространенными приборами в машиностроении, строительстве, энергетике.

В последнее время стали широко использоваться инклинометры с емкостными датчиками, измеряющими угол отклонения прибора. Области использования инклинометра весьма разнообразны. Здесь можно отметить нефтяную и газовую промышленности при бурении скважин под углом к горизонту, определение величины деформации различных опор и балок. Инклинометр изготовлен так, что имеет линейную зависимость выходного сигнала от угла наклона

в одной рабочей плоскости (например, в вертикальной), а в другой не изменяет показаний.

Широкое распространение имеют также датчики уровня жидкости.

Емкостные датчики обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими, среди которых:

- простота изготовления, использование недорогих материалов для производства;
- малые габариты и вес, малое потребление энергии;
- высокая чувствительность;
- долгий срок эксплуатации;
- малая инерционность.

Недостатки:

- малый коэффициент передачи;
- высокая требовательность к экранированию;
- возможность пробоя конденсаторов высоким напряжением;
- необходимость работать на повышенных частотах.

2.6. Датчики температуры

Одними из самых распространенных измерений являются температурные. Параметры измерений температуры для различных технологических процессов могут сильно отличаться друг от друга по различным характеристикам (точности, быстродействия и др.). Но общим для любого температурного датчика является преобразование измеряемой температуры в электрический сигнал, который может быть далее преобразован в цифровую форму.

Существуют два основных способа измерения температуры — контактный и бесконтактный. Контактный способ основан на непосредственном контакте с исследуемым объектом. Он обеспечивает достаточно высокую точность измерений, но обладает относительно низким быстродействием, связанным с процессом прогрева материала самого датчика при вступлении в контакт с объектом. Бесконтактный способ основан на передаче тепловой энергии через лучеиспускание. Сам датчик устанавливается на некотором расстоянии от исследуемого объекта, поэтому его показания менее точны, чем при контактном способе.

2.6.1. Термометры сопротивления

Самым распространенным датчиком температуры является *термометр сопротивления* (ТС). Принцип его действия основан на изменении электрического сопротивления металлов от температуры. Это значит, что материал, из которого изготавливается такой датчик, с изменением температуры меняет свое сопротивление. Коэффициент, описывающий эту зависимость, называется температурным коэффициентом сопротивления.

Конструктивно ТС представляет собой миниатюрную катушку из никелевого, медного или платинового провода, заключенную в защитный корпус. Выводы катушки соединены с клеммами, расположенными на гильзе датчика. Совокупность катушки, гильзы и клемм называется чувствительным элементом, а все остальное — головкой датчика. Для удобства применения все ТС стандартизируют по нулевому сопротивлению, т. е. сопротивлению при температуре 0 °С. Маркируются термометры по типу металла, используемого для измерения. Например, большое распространение имеют медные датчики ТСМ100 и платиновые ТСП100.

Термометры сопротивления находят применение для измерения температур от –50 до 200 °С. Основными параметрами ТС являются температурный коэффициент термического сопротивления, номинальное сопротивление, диапазон измеряемых температур и номинальная статическая характеристика.

Температурный коэффициент ТС характеризует относительное изменение величины сопротивления от температуры в пределах 0—100 градусов:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_{100}} \cdot 100 \, \%.$$

Номинальное сопротивление ТС — это нормированное изготовителем сопротивление при 0 °С. Существует ряд таких сопротивлений: 10; 50; 100; 500 Ом. Зная номинальное сопротивление ТС и его температурный коэффициент, несложно построить его номинальную статическую характеристику.

Температурный диапазон для различных ТС составляет:

- от –196 до +660 °С (платина);
- от –50 до +200 °С (медь);
- от –60 до +180 °С (никель).

На рис. 2.16 показаны обозначения ТС на принципиальных схемах.

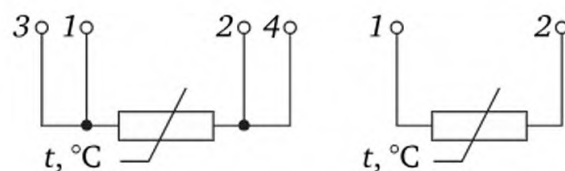


Рис. 2.16. Обозначения ТС на принципиальных схемах

Измеряемое напряжение снимается с клемм 1 и 2, а внешний источник с добавочными резисторами подключается к клеммам 3 и 4. В некоторых конструкциях ТС эти клеммы могут быть совмещены. Падение напряжения на ТС зависит от величины его сопротивления, а следовательно, от температуры окружающей среды $t_{\text{окр}}$.

Преимущества ТС:

- высокая точность измерений (менее $\pm 1^\circ\text{C}$);
- имеется возможность исключить влияние изменения сопротивления линий связи на результат измерения;
- практически линейные статические характеристики.

Недостатки ТС:

- 1) относительно малый диапазон измерений (по сравнению с термопарой);
- 2) дороговизна (в сравнении с термопарой из неблагородных металлов);
- 3) требуется дополнительный источник питания для задания тока через датчик.

2.6.2. Термопара

Термопары, или *термоэлектрические преобразователи*, нашли широкое применение. Принцип действия термопары основан на возникновении термоЭДС в месте спая двух разнородных металлов. Величина ЭДС зависит от разности температур между «горячим» концом или слоем и «холодным» концом, представляющим собой точку подключения проводников к измерительному прибору.

Конструкцию термопары можно представить в виде, показанном на рис. 2.17.

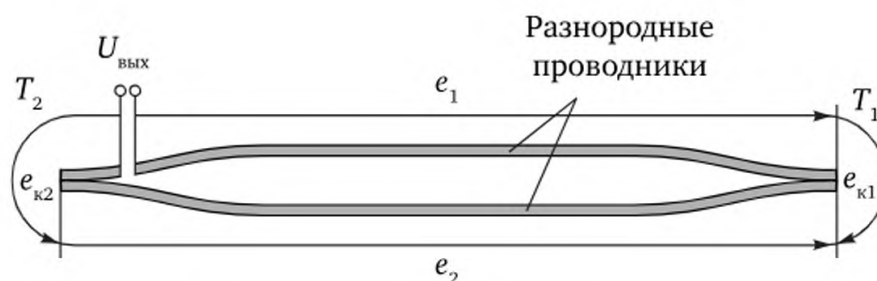


Рис. 2.17. Схема измерения температуры термопарой

При равенстве температур T_1 и T_2 обеих слоев результирующая термоЭДС равна нулю. Отметим, что значение результирующей термоЭДС зависит только от металлов проводников и от температур слоев.

Термопары позволяют измерять температуру в диапазоне от -200 до 2200°C . Для их изготовления используют как благородные металлы и их сплавы (платина, платинородий), так и неблагородные (хромель, алюмель).

Постоянная времени термопары зависит как от конструкции, так и от контакта «горячего» спая со средой, и обычно может достигать нескольких минут. Имеются термопары, у которых постоянная времени лежит в пределах $5\text{—}20$ с и менее.

Для повышения точности измерения свободные концы отводят от головки термопары в зону с постоянной температурой, чтобы возникающая термоЭДС была пропорциональна температуре среды. Удлинитель изготавливают из металлов или сплавов, имеющих те же свойства, что и электроды термопары.

Следует помнить, что, развиваемая термоЭДС, в значительной степени зависит от чистоты применяемых материалов. Некоторые параметры термопар, используемых в промышленности, приведены в табл. 2.2

Таблица 2.2

Некоторые параметры термопар

Обозначение термопары	Обозначение термоэлектродов	Материалы	Пределы измерений
ТПП	ПП-1	Платинородий (10 % родия), платина	-20 ÷ 1200
ТПР	ПР-30	Платинородий (3 % родия)	300 ÷ 1600
ТХА	ХА	Хромель — алюмель	-50 ÷ 1000
ТХК	ХК	Хромель — конель	-50 ÷ 600

Для измерения температур ниже -50 °С находят применение термопары типа медь-константан (до -270 °С), а для температур выше 1800 °С изготавливаются термопары на основе тугоплавких металлов.

Преимущества термопар:

- высокая точность измерения температуры (до ±0,01 °С);
- большой температурный диапазон (от -250 до 2500 °С);
- простота конструкции;
- дешевизна;
- надежность

Недостатки:

- зависимость термоЭДС от температуры нелинейна, что создает трудности при разработке вторичных приборов;
- на показания влияет температура «холодного» спая, на которую нужно вносить поправку;
- для получения высокой точности измерений температуры требуется индивидуальная градуировка термопары;
- малая чувствительность;
- высокое исходное сопротивление.

Серьезным недостатком как ТС, так и термопар является необходимость введения датчиков в контролируемую среду, где они вносят искажения в исследуемое температурное поле. Это, в свою очередь, приводит к искажениям характеристик самих датчиков, особенно при измерениях высоких температур.

2.6.3. Пирометры

От указанных недостатков контактных датчиков температуры свободны *пирометры* — бесконтактные датчики, основанные на использовании излучения нагретых тел.

Различают три вида пирометров:

1) флуоресцентные. На поверхность объекта, температуру которого хотят измерить, наносят фосфорный слой. При измерении температуры объекта его подвергают воздействию ультрафиолетовыми лучами. Интенсивность возникающего при этом свечения зависит от температуры объекта;

2) интерферометрические датчики основаны на сравнении свойств, излучаемых датчиком, двух световых лучей: контрольного и пропущенного через среду, параметры которой меняются в зависимости от температуры;

3) датчики на основе растворов, меняющих цвет при температурных воздействиях. Как отмечалось выше, точность пирометрических датчиков ниже по сравнению с контактными. При выборе пирометрических датчиков следует обратить внимание на ряд факторов, ограничивающих их практическое применение:

- диапазон измеряемой температуры,
- возможность погружения датчика в измерительную среду,
- длительность работы датчика без замены и калибровки,
- характеристики выходного сигнала,
- время срабатывания, погрешность, напряжение питания и др.

2.7. Ультразвуковые и струнные датчики

2.7.1. Ультразвуковые датчики

Работа ультразвукового датчика основана на пьезоэффекте — изменении геометрических размеров керамической или кварцевой пластины в электрическом поле, а также появлении электрического поля на поверхности пластины при механических воздействиях на нее.

Известно, что звук с частотой более чем 16 кГц не воспринимается человеческим ухом. Подобные частоты называют ультразвуковыми. Колебания пластины с частотой прикладываемого поля (например, 300 кГц) вызывает появление ультразвуковых волн той же частоты.

Оценивая скорость распространения звука и время возврата отраженного звука от объекта (его рабочий цикл), можно определить точное расстояние до предмета. Ультразвуковые датчики работают с пьезопреобразователем, который является как звуковым излучателем, так и приемником. Преобразователь посылает пакет импульсов и преобразует задержку, отраженного от объекта звукового сигнала

(эхо), в напряжение, пропорциональное времени распространения эха, как показано на рис. 2.18.

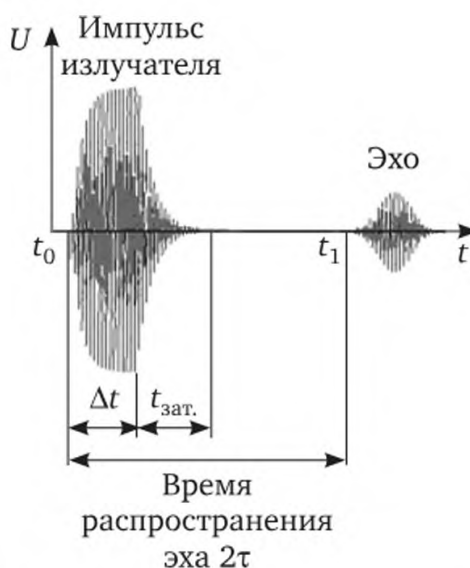


Рис. 2.18. Принцип работы ультразвукового датчика

Датчик вычисляет время движения звука от излучателя до объекта и назад (диффузионный режим работы) или проверяет, был ли получен посланный сигнал. Длительность излучаемого импульса Δt и длительность затухания $t_{\text{зат}}$ являются критическими для формирования так называемой слепой зоны, в который датчик не может обнаружить предмет. Активный диапазон ультразвукового датчика обозначается как рабочий диапазон обнаружения. Диапазон обнаружения — расстояние, в котором датчик обнаруживает объект.

С помощью ультразвуковых датчиков могут определяться твердые, жидкие, зернообразные и порошкообразные объекты. Окраска объекта не оказывает влияние на расстояние срабатывания. Ультразвуковым датчиком определяются надежно прозрачные объекты. Температура объекта оказывает влияние на рабочий диапазон датчика. Довольно широкое распространение ультразвуковые датчики нашли в медицине для диагностики различных заболеваний.

Существует несколько способов обнаружения объектов с помощью ультразвука:

- 1) непосредственное обнаружение с одним или двумя отдельными преобразователями. Контролируется пространство перед датчиком на наличие объекта, от которого отражается ультразвуковая волна;
- 2) рефлекторный метод. Контролируется пространство между датчиком и рефлектором. Отраженный сигнал улавливается приемником. Срабатывание датчика происходит при пересечении луча объектом;
- 3) метод прерывания луча или оппозитный метод. Излучатель и приемник устанавливаются на одной линии. Звуковая волна про-

ходит между ними только один раз. Датчики, работающие по прерыванию луча, часто называют барьерными.

Достоинства ультразвуковых датчиков:

- работают в сильно загрязненной и запыленной среде;
- большие рабочие расстояния;
- взрывозащищенные варианты использования;
- обнаруживают объекты из любого материала;
- самый простой и дешевый бесконтактный способ измерения

уровня жидкости.

Недостатки датчиков:

- широкая диаграмма направленности;
- чувствительность к случайным препятствиям;
- невысокая точность при измерении температуры, давления и состава воздуха;
- невысокое быстродействие;
- относительно высокая стоимость.

2.7.2. Струнные датчики

Струнные датчики применяются для измерения как неэлектрических, так и электрических величин. При измерении частотным методом измеряемая величина преобразуется в переменное напряжение, частота которого зависит от этой величины. Достоинством частотного метода измерения является то, что при его обработке не возникает дополнительная погрешность.

Большое развитие для преобразования неэлектрических и электрических величин в частоту получили струнные датчики. Принцип действия струнного датчика основан на зависимости собственной частоты колебаний f натянутой струны длиной l , массой m , от силы натяжения $F(f)$:

$$f = 0,5 \sqrt{\frac{F}{ml}}.$$

На рис. 2.19 представлен датчик для измерения давления. Он состоит из струны 1, возбудителя 2 и приемника 3. Одним концом струна жестко закреплена, а вторым — соединена с мембраной-преобразователем 4. При изменении давления меняется натяжение струны. С помощью электромагнита возбудителя струна выводится из состояния покоя и начинает колебаться с частотой f , зависящей от давления P . Приемник 3 преобразует перемещение струны в электрический сигнал той же частоты. В качестве приемника чаще всего используют электромагнитный датчик, который может быть попеременно то возбудителем, то приемником. При подаче напряжения он возбуждает колебания струны, а когда струна уже колеблется, то с этой же обмотки снимается напряжение, частота которого равна частоте колебаний струны.

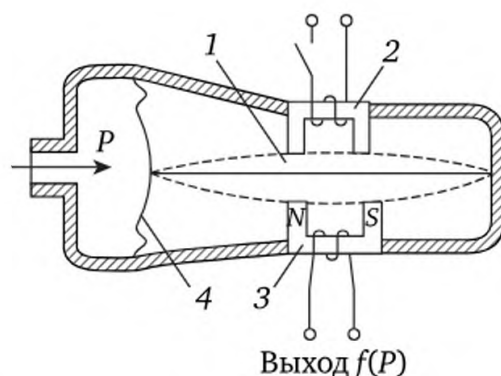


Рис. 2.19. Струнный датчик для измерения давления

Струнные датчики используются в двух режимах — автогенераторном и в режиме работы по запросу. В первом случае струна постоянно колеблется, а во втором работает в более легких условиях.

Конструкция, материал струны и способ ее крепления играют первостепенную роль для обеспечения точности струнного датчика. Выбор материала зависит от многих факторов, в том числе от условий эксплуатации и способов возбуждения. Материал струны должен обладать высокой прочностью в условиях вибрации, коэффициентом линейного расширения, равным этому же коэффициенту материала датчика. Для увеличения точности струнного датчика и исключения помех промышленной частоты 50 Гц стремятся увеличить частоту колебаний струны. Струнные датчики обеспечивают высокую точность измерений, их погрешность в условиях эксплуатации не превышает 0,4 %. Они обладают малой инерционностью, высокой чувствительностью и надежностью.

2.8. Фотоэлектрические датчики

Фотоэлектрическим датчиком называют датчик, который реагирует на изменение освещенности. В них используется явление *фотоэффекта*, под которым понимается изменение свойств вещества при разной освещенности. Принцип фотоэффекта заключается в том, что при освещении поверхности металла или полупроводника частицы лучистой энергии передают электронам освещенного вещества дополнительную энергию. В результате этого ускоряется движение электронов и изменяется ток через фотодатчик.

Фотодатчик состоит из источника светового потока и приемника. В качестве источника может быть исследуемый объект, отражающий световой поток либо излучающий его сам, как это показано на рис. 2.20.

Фотоэлементы обладают световой характеристикой, которая зависит от чувствительности фотоэлемента.

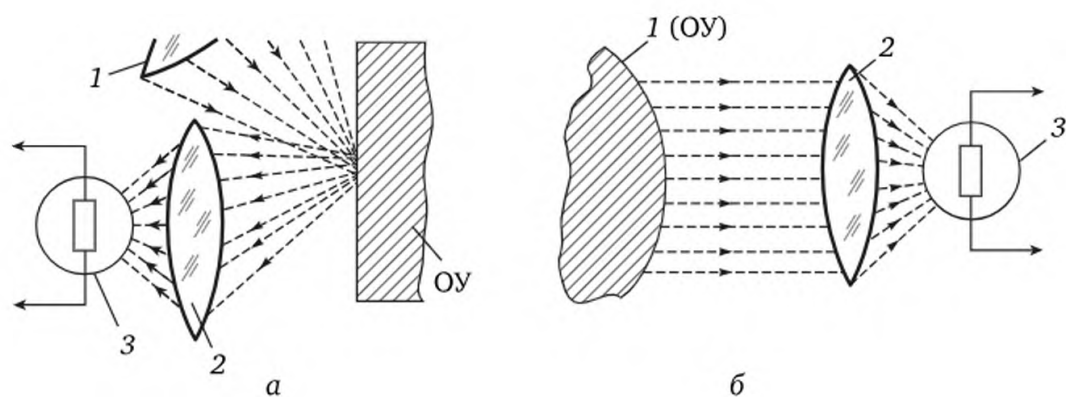


Рис. 2.20. Фотодатчик:

а — со световым потоком, отраженным от объекта управления;
 б — со световым потоком, излучаемым объектом управления; 1 — источник света; 2 — собирающая линза; 3 — фотосопротивление

В фотоэлектрических датчиках используют три вида фотоэффекта:

- внешний, состоящий в том, что под влиянием светового потока происходит эмиссия электронов из катода электронной лампы. Величина тока эмиссии зависит от освещенности катода;

- внутренний, состоящий в том, что электропроводность (активное сопротивление) полупроводника находится в зависимости от его освещенности;

- вентильный фотоэффект называют промежуточным, при котором освободившиеся электроны переходят из слоя освещенного вещества в слой неосвещенного вещества, отделенный запирающим слоем. Ввиду избытка электронов в одном слое и недостатка в другом возникает ЭДС, зависящая от освещенности.

Электрический ток при воздействии лучистой энергии без других источников создают только фотоэлементы с вентильным фотоэффектом.

2.8.1. Фотоэлектрические датчики с внешним фотоэффектом

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом, показанный на рис. 2.21, представляет собой вакуумную или газонаполненную лампу с катодом из фоточувствительного слоя и анодом, выполненным в виде металлической пластины или кольца. Наиболее часто такие фотоэлементы используют в качестве датчика, реагирующего на наличие или отсутствие светового луча.

Чувствительность фотоэлемента — это отношение величины фототока в микроамперах к величине светового потока в люменах. Из рис. 2.21 очевидно, что эта характеристика линейна для вакуумных фотоэлементов:

$$I_{\Phi} = K_{\Phi} \Phi,$$

где Φ — световой поток, лк; K_{Φ} — коэффициент пропорциональности.

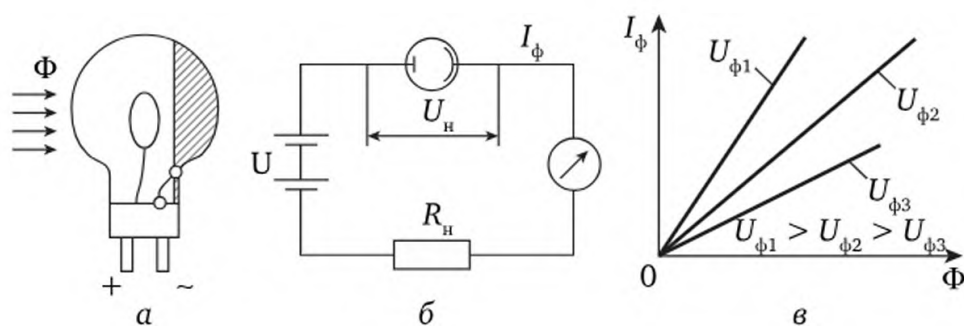


Рис. 2.21. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом:
а — вакуумная лампа; б — схема включения; в — характеристика чувствительности

Зависимость фототока фотоэлемента от напряжения на аноде называется *вольт-амперной характеристикой*. *Световой характеристикой* называется зависимость фототока от светового потока, падающего на фотокатод.

Следует отметить, что фотоэлемент реагирует не только на интенсивность светового потока, но и на его частоту, а поэтому разделяют чувствительность на интегральную (по интенсивности) и спектральную (по частоте). *Интегральной чувствительностью* называют величину тока фотоэлемента, создаваемого всем спектром потока. *Спектральной чувствительностью* фотоэлемента называется величина тока фотоэлемента, создаваемого световым потоком одной частоты.

Вакуумные фотоэлементы практически безынерционны, но дают меньший фототок по сравнению с газонаполненными, которые обладают инерционностью. На рис. 2.22 показаны совмещенные характеристики вакуумного и газонаполненного фотоэлементов.

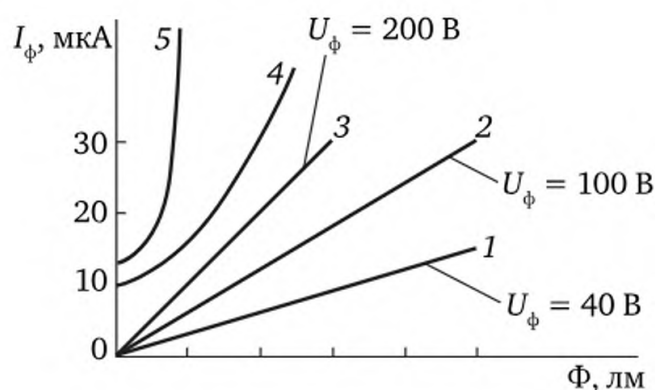


Рис. 2.22. Чувствительность вакуумного (1, 2, 3) и газонаполненного фотоэлементов (4, 5)

Использование фотоэлементов в схемах автоматики требует применения усилителей с большим коэффициентом усиления.

2.8.2. Фотоэлектрические датчики с внутренним фотоэффектом

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления) имеют значительно бóльшую чувствительность, чем фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Схема устройства фотосопротивления показана на рис. 2.23.

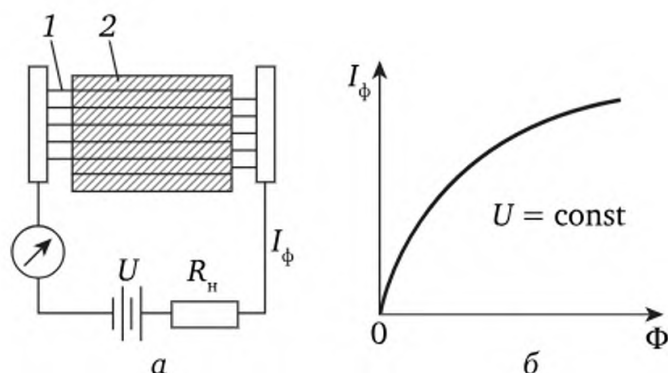


Рис. 2.23. Схема включения фотосопротивления (а) и зависимость фототока I_ϕ от величины светового потока Φ (б)

Здесь на решетку 1 из проводников наносится фоточувствительный слой 2. При изменении освещенности решетки будет меняться электрическое сопротивление фотоэлемента, а следовательно, зависимость фототока I_ϕ от величины светового потока Φ при постоянном напряжении питания U . При увеличении освещенности сопротивление падает, что приводит к увеличению тока в цепи, в которую включено фотосопротивление, что фиксируется измерительным прибором. Особенностью зависимости фототока I_ϕ от величины светового потока является ее нелинейность и падение чувствительности с увеличением освещенности. К недостаткам фотосопротивления относится также значительная инерционность и зависимость от температуры элемента.

2.8.3. Фотоэлектрические датчики с вентильным фотоэффектом

Вентильные фотоэлементы, или фотоэлементы с «запирающим слоем», принципиально отличаются от предыдущих тем, что не требуют для своей работы дополнительного источника питания. Принцип действия вентильных фотоэлементов с «запирающим слоем» состоит в следующем: световой поток (рис. 2.24, а) проходит через полупрозрачный проводник 4 одного из контактов, попадает на границу между запирающим слоем 3 и полупроводником 2, т. е. на фотослой, нанесенный на металлическую прокладку 1. Полупроводник и проводник заряжаются разноименно, так как запирающий слой пропускает электроны, освобожденные из металла только в одном

направлении. Световые характеристики вентильного фотоэлемента представлены на рис. 2.24, б.

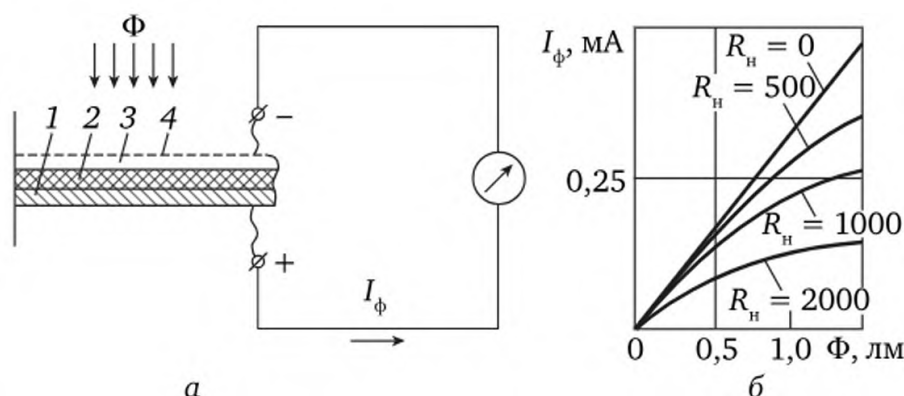


Рис. 2.24. Вентильный фотоэлемент (а) и световые характеристики вентильного фотоэлемента (б)

С увеличением нагрузочного сопротивления световая характеристика вентильного фотоэлемента приобретает нелинейный характер. Из рис. 2.24 очевидно, что чувствительность датчика $S_{\Phi} = \frac{dI_{\Phi}}{d\Phi}$ с увеличением освещенности падает. Наибольшую чувствительность они имеют при малых значениях освещенности.

К недостаткам фотосопротивлений следует отнести:

- низкую чувствительность по напряжению;
- нелинейность характеристик;
- инерционность;
- зависимость параметров от температуры;
- необходимость включения на низкоомную нагрузку.

2.9. Энкодеры

Энкодеры — преобразователи линейных и угловых перемещений в электрический сигнал. Известные и широко используемые в системах автоматики электромеханические преобразователи угловых перемещений и скорости (тахогенераторы, сельсины, вращающиеся трансформаторы) подробно рассматриваются в теме 3. Здесь же рассматриваются только энкодеры. Различают два типа энкодеров:

- 1) инкрементальные;
- 2) абсолютные.

Инкрементальные энкодеры предназначены для определения угла поворота вращающегося объекта. Они генерируют последовательный импульсный цифровой код, содержащий информацию относительно угла поворота объекта. Если вал останавливается, то останавливается и передача импульсов. Основным параметром датчика является

количество импульсов за один оборот. Мгновенную величину угла поворота определяют количеством импульсов от старта. По вычислению количества импульсов во времени определяют угловую скорость в оборотах в минуту. Для определения направления вращения используют два выходных канала, в которых идентичные последовательности импульсов сдвинуты друг от друга на 90° . Для того чтобы найти абсолютное положение вала, имеется нулевая метка.

Абсолютные энкодеры выделяют цифровой код, различный для каждого положения объекта, что позволяет определить угол поворота оси даже в случае выключения и включения питания. Энкодер не требует возвращения объекта в начальное положение, что является его преимуществом. Поскольку угол поворота всегда известен, то счетчик импульсов не нужен. Сигнал абсолютного энкодера не зависит от помех, а поэтому не нужно точно устанавливать вал. Этот энкодер используется в высокоточных системах.

По принципу действия различают энкодеры:

- оптические;
- магнитные;
- магниторезистивные.

2.9.1. Оптические энкодеры

Оптический энкодер, показанный на рис. 2.25, состоит из специального вращающегося оптического диска, светоизлучающего диода и фотодетектора. Диск с нанесенной оптической шкалой закреплен на валу. Кодовый диск вращается перед неподвижной маской, перекрывая световое излучение светодиода. Свет, проходящий через маску, принимается фотодетектором, генерирующим импульсы в форме квазисинусоиды, которая преобразуется в меандр, обрабатываемый счетчиком. При вращении объекта специальный датчик считывает информацию и преобразует ее в импульсы.

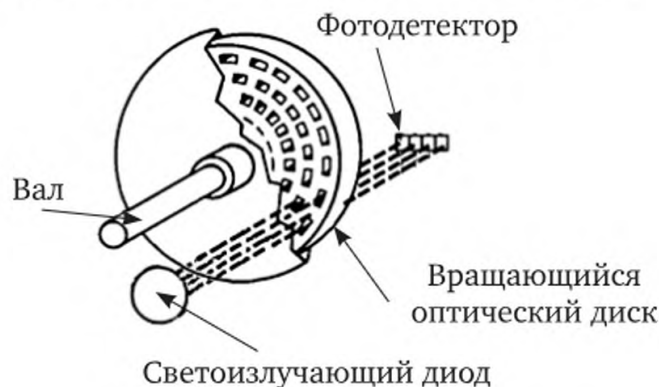


Рис. 2.25. Схема оптического энкодера

Оптические энкодеры различают по типу получаемой информации:

- на одиночные;
- двойные (квадратурный);

- на двоичных кодах;
- на кодах Грея.

Одиночный энкодер имеет оптический диск с равномерно нанесенными радиальными прорезями по кругу. Углу поворота соответствует количество подсчитываемых импульсов. Достоинство такого энкодера — дешевизна и простота реализации.

Недостатки:

- при запуске системы не ясно, начальное положение вала;
- ошибки при подсчете импульсов на границе прорези — могут быть ложные срабатывания;
- невозможно определить направление вращения.

Квадратурный энкодер имеет оптический диск с прорезями, показанными на рис. 2.26.



Рис. 2.26. Оптический диск квадратурного энкодера

В таком энкодере считывается количество импульсов и учитывается направление вращения. Кроме того, можно избежать ложных срабатываний при подсчете импульсов.

Недостаток — при запуске неизвестно начальное положение вала.

Энкодер на двоичных кодах. Оптический диск такого энкодера обеспечивает: отсутствие ошибок при запуске, отсутствие ошибок при подсчете импульсов, возможность определить направление вращения.

Недостатки:

- проблемы с граничным положением — если меняется более одного бита;
- дороговизна и сложность реализации;
- ограничения в разрешающей способности — чем выше точность, тем больше нужно каналов для увеличения разрядности передаваемого угла.

Энкодер на кодах Грея. Оптический диск с кодом Грея обеспечивает: определение точного положения вала в каждый момент времени, отсутствие ошибок при запуске системы, подсчете импульсов на границах, возможность определить направление вращения, отсутствие проблем с граничными положениями — меняется одновременно не более одного бита.

Недостатки:

- увеличение стоимости и сложность реализации;
- дополнительные ограничения в разрешающей способности — чем выше точность, тем больше необходимо каналов.

2.9.2. Магнитный энкодер

Магнитный энкодер, показанный на рис. 2.27, включает в себя вал с магнитом и датчиком Холла, который фиксирует прохождение магнитных полюсов и измеряет скорость и направление вращения.

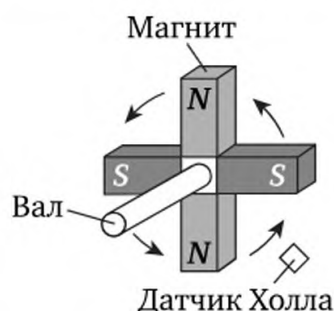


Рис. 2.27. Схема магнитного энкодера

2.9.3. Магниторезистивный энкодер

Магниторезистивный энкодер (рис. 2.28) состоит из катушки, закрепленной на валу и помещенной в магнитное поле. При вращении вала витки катушки будут изменять положение относительно магнитных силовых линий поля. Следовательно, наводимая ЭДС и ток в катушке будут меняться в зависимости от поворота вала.

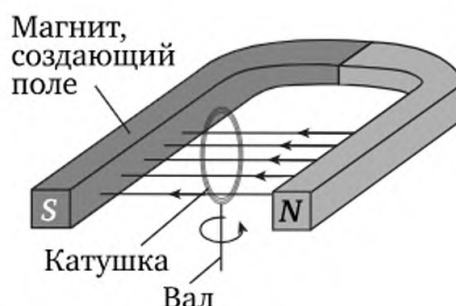


Рис. 2.28. Схема магниторезистивного энкодера

При выборе энкодера обращают внимание на следующие его параметры:

- 1) число импульсов на оборот (число бит у абсолютных энкодеров). От данного показателя зависит точность системы — чем больше импульсов, тем выше точность;
- 2) тип выходного сигнала энкодера (двоичный код, код Грея и др.). Данный параметр влияет на снятие сигнала с энкодера и дальнейшую его передачу;

- 3) напряжение питания. От этого показателя зависят работа системы и точность снятия сигнала;
- 4) длина кабеля или тип разъема влияют на возможности установки рабочей системы;
- 5) другие требования по конструкции и крепежу. Данные параметры влияют на устойчивость и жесткость установки, и тем самым, — на точность системы;
- 6) важна также степень защиты энкодера от проникновения пыли и влаги.

2.10. Датчики Холла

Прибор основан на эффекте Холла (рис. 2.29), который заключается в следующем: если на любой полупроводник, вдоль которого протекает электрический ток I , оказать воздействие перпендикулярным магнитным полем напряженностью H , то возникает ЭДС (E), называемая ЭДС Холла:

$$E = KIH, \quad (2.6)$$

где $E = \frac{Kg}{d}$ — коэффициент, зависящий от материала и толщины пластины d ; Kg — постоянная Холла.

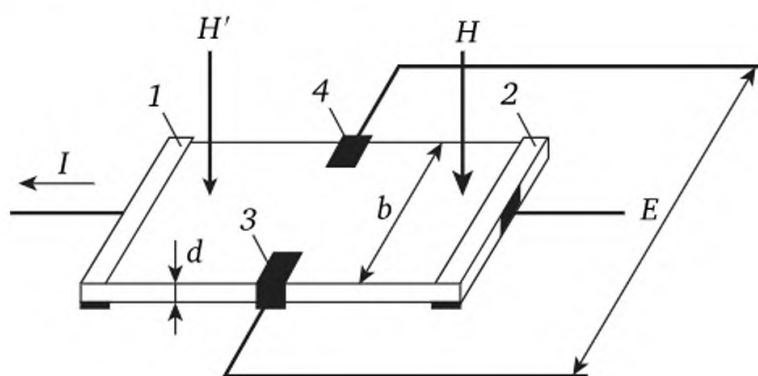


Рис. 2.29. Датчик Холла

Ток вводится и выводится через контакты 1 и 2, а напряжение Холла измеряется между точками 3 и 4. Эффективная площадь датчика Холла ограничивается концами электродов. За счет изменения размеров и геометрии датчики могут быть приспособлены для выполнения различных функций. Датчик Холла — это, по существу, датчик магнитного поля.

Практическое применение ЭДС Холла началось с развитием микроэлектроники и микросхемотехники. Датчики стали применять в генераторах Холла. Датчики могут быть линейными (датчики

тока, положения, расхода и т. п.) и логическими, или цифровыми (датчики приближения, частоты вращения, импульсов и т. д.).

Аналоговые датчики преобразуют индукцию поля в напряжение. Величина, которую может показать датчик, зависит от полярности и силы поля. При этом следует учитывать дистанцию, на которую он установлен.

Цифровые датчики определяют наличие или отсутствие поля. Принцип работы довольно прост: датчик выдает логическую единицу, если индукция достигает определенного порога, и выдает логический ноль, если порог не достигнут. Наличие поля может быть не зафиксировано, если поле слабое. Минус такого датчика — наличие зоны нечувствительности между порогами. Цифровые датчики разделены:

- *на биполярные* — реагируют на смену полярности поля или, если одна полярность включает датчик, а другая — выключает;
- *униполярные* — срабатывает при наличии поля определенной полярности и выключается при снижении индукции.

Основные характеристики линейных датчиков Холла:

- полная шкала выхода соответствует диапазону выходных напряжений $U_{\text{вых}}$, в которых нелинейность не выходит из заданных пределов. Определяется как часть напряжения питания;
- диапазон измеряемой индукции, устанавливаемый изготовителем в гауссах или миллитеслах;
- чувствительность, определяемая как крутизна характеристики преобразования в милливольт на гаусс (мВ/Гс) или милливольт на миллитеслу (мВ/мТл);
- погрешность линейности характеристики преобразования — отклонение статической характеристики преобразования датчика от идеальной прямой линии в заданном диапазоне. Один из способов определения погрешности линейности состоит в использовании метода наименьших квадратов, который математически обеспечивает получение прямой линии наилучшего приближения к экспериментальным точкам данных. Указывается в процентах от полной шкалы;
- напряжение нуля магнитного поля — значение выходного напряжения, соответствующее отсутствию магнитного поля;
- температурный дрейф нуля — изменение напряжения нуля, вызванное изменением температуры. Указывается в процентах на градус от напряжения нуля, соответствующего 25 °С;
- температурный дрейф чувствительности — изменение чувствительности, вызванное изменением температуры. Указывается в процентах на градус от напряжения полной шкалы, соответствующего 25 °С;
- время отклика, определяется как время изменения выходного сигнала от 10 до 90 % установившегося значения его приращения при скачкообразном изменении магнитного поля;

- полоса пропускания f_s определяется по уровню снижения чувствительности на 3 дБ в режиме малого сигнала.

Преимущество датчика Холла — его относительно невысокая стоимость, неприхотливость, долговечность. Надежность датчика определяется тем, что в нем отсутствуют трущиеся детали.

Наиболее часто датчики Холла применяются в качестве датчиков тока, положения, расхода, угла поворота, вибрации, при создании бесколлекторных двигателей постоянного тока и т. д.

2.11. Методика испытаний датчиков

Методика испытаний однотипна для большинства видов датчиков. Для датчика как чувствительного элемента формируют изменяемую тестируемую среду и фиксируют его показания для разных значений параметров этой среды. На рис. 2.30 представлена обобщенная функциональная схема стенда для испытаний датчиков, с помощью которой можно пояснить эту методику.



Рис. 2.30. Обобщенная функциональная схема стенда для испытаний датчиков

Например, при испытании термометра сопротивления с помощью устройства управления (блок УУ) обеспечиваются требуемые условия функционирования датчика как элемента замкнутой электрической цепи. Здесь имеется в виду подключение его к источнику питающего напряжения с дополнительным резистором для ограничения тока в цепи датчика. Помимо этого, блок УУ должен обеспечивать состояние измеряемой среды. Например, нагрев датчика до определенной, задаваемой блоком «Задание», температуры. Эта температура измеряется блоком «Измерительный прибор 1». Текущее значение сопротивления датчика определяется после измерения напряжения и тока через датчик блоком «Измерительный прибор 2». Полученные значения сводят в таблицы и строят соответствующие характеристики датчика.

Тема 3

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.1. Электромагниты, электромагнитные реле, трансформаторы

Электромагниты и на их базе электромагнитные реле образуют обширный круг коммутационной аппаратуры, которая используется в промышленной автоматике. Сюда относятся магнитные пускатели, контакторы, собственно реле переменного и постоянного тока. Магнитные пускатели и контакторы, в свою очередь, являются мощными электромагнитными реле, используемыми чаще всего для пуска и останова двигателей, соответственно, переменного и постоянного тока.

Помимо этого, электромагниты зачастую выполняют функцию исполнительных элементов, осуществляя непосредственное перемещение или удерживание определенных регулирующих деталей или устройств механизмов. Несмотря на самые разные виды конструкций электромагнитов, некоторые из которых показаны на рис. 3.1, в их устройстве всегда можно выделить сердечник 1 и обмотку электромагнита 2 из медного провода. Сама обмотка обычно намотана на катушку, которая насаживается на сердечник, а в некоторых случаях обмотка может быть намотана непосредственно на сердечнике на изолированной подложке. Схематично такой электромагнит показан на рис. 3.1, а. Сердечник электромагнита может быть составной частью магнитопровода (ярма), в котором выделяют подвижные 4 и неподвижные 3 части. Подвижные части могут быть поворотными (рис. 3.1, б) или втягиваемыми (рис. 3.1, в).

Магнитопроводы для электромагнитов, работающих на постоянном токе, делают из сплошного магнитомягкого металла, а для электромагнитов, работающих на переменном токе, — шихтованными для уменьшения потерь при перемагничивании. Шихтованный магнитопровод изготавливают в виде пакета тонких изолированных друг от друга пластин из специальной электротехнической стали с узкой петлей гистерезиса.

Электромагнитные реле, в конструкцию которых базовой частью входит электромагнит, находят широкое применение в авто-

матических системах и системах телемеханики для целей автоматизации следующих функций: сигнализации и контроля состояния объекта, пуска, а также остановки, блокировки и защиты его от аварийных ситуаций.

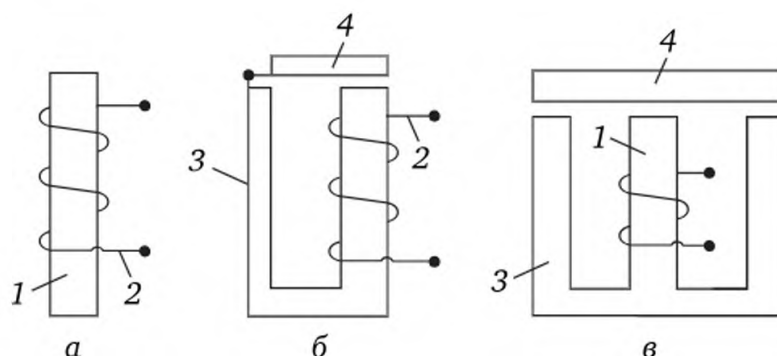


Рис. 3.1. Виды электромагнитов:

а — с разомкнутым магнитопроводом; *б* — с поворотным сердечником;
в — с втягивающимся сердечником

Основным достоинством реле является то, что с их помощью можно осуществлять коммутацию высоковольтных и сильноточных цепей, используя для этого относительно маломощные и низковольтные источники, питающие обмотки электромагнитов реле.

Реле изготавливаются для работы на постоянном или на переменном токе. Как правило, реле постоянного тока делают нейтральным, т. е. его работа не зависит от полярности подаваемого на обмотку электромагнита управляющего напряжения. Это же относится и к реле, работающим на переменном токе. Отдельную группу составляют поляризованные реле, которые осуществляют переключение контактов в зависимости от полярности приложенного к обмотке реле управляющего напряжения.

На рис. 3.2 представлено реле, работающее на постоянном токе, с одной парой нормально разомкнутых (в отсутствие тока в катушке электромагнита) контактов. На рисунке показаны: катушка с обмоткой электромагнита 1, поворотная часть магнитопровода 2, возвратная пружина 3, пара контактов 4, которые разомкнуты под действием поворотной части магнитопровода благодаря возвратной пружине, если не включен электромагнит.

Реле могут работать на замыкание, размыкание и переключение до нескольких групп контактов. Основными их характеристиками являются:

- токи срабатывания и отпускания электромагнита;
- рабочий ток электромагнита, который обеспечивает надежное удержание контактов;
- максимально допустимый ток через контакты;
- времена срабатывания и отпускания реле.

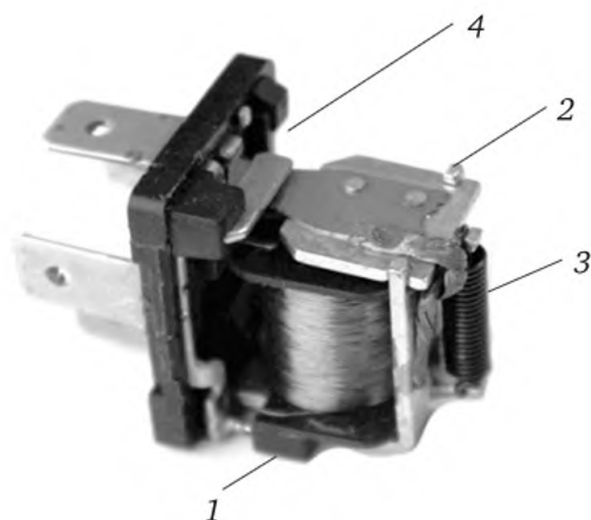


Рис. 3.2. Нейтральное реле и составляющие его элементы

Указанные характеристики определяют широкую номенклатуру различных реле, выпускаемых промышленностью, данные по которым сведены в каталоги.

Следует отметить широкое распространение *герконов* — магнитоуправляемых герметизированных контактов. Конструктивно геркон представляет собой стеклянную ампулу с впаянными вовнутрь двумя контактами. Концы контактов выведены наружу. Контакты замыкаются в магнитном поле подносимого извне постоянного магнита. Основным недостатком герконов является относительно небольшой ток, пропускаемый через его контакты.

Трансформаторы. *Трансформатор* является устройством для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Трансформаторы подразделяются на силовые и специальные. Конструкция силовых трансформаторов делается такой, чтобы потери передаваемой мощности были минимальными. Силовые трансформаторы делаются как на большие мощности (трехфазные трансформаторы для преобразования и передачи энергии от электростанций к потребителям), так и на малые мощности (однофазные трансформаторы радиоэлектронных устройств и САУ). Принцип работы трансформатора и его математическое описание удобно рассматривать на примере однофазного трансформатора малой мощности.

Конструктивно трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода (сердечника) и ряда обмоток, намотанных на специальные каркасы в виде катушек, которые, в свою очередь, надеваются на магнитопровод. Последние делают из набора тонких пластин специальной электротехнической стали с узкой петлей гистерезиса либо из ленты такой стали. Пластины в наборе изолируют друг от друга для уменьшения потерь от вихревых токов.

На рис. 3.3 показаны два силовых трансформатора (стержневой и броневой).

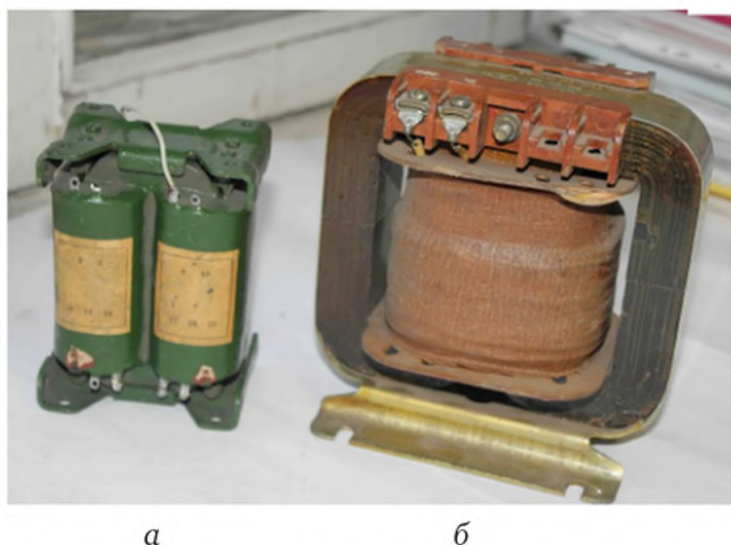


Рис. 3.3. Стержневой (а) и броневой (б) однофазные силовые трансформаторы

Стержневой трансформатор имеет две изолированные друг от друга катушки с обмотками, поэтому он предпочтителен для высоких напряжений. Броневой трансформатор имеет одну общую катушку с обмотками на среднем стержне магнитопровода. В нем меньше потери от потоков рассеивания.

Рассмотрим принцип работы трансформатора и его схему замещения. Пусть имеется стержневой трансформатор с двумя обмотками. Первичная обмотка с числом витков w_1 характеризуется активным сопротивлением r_1 и индуктивностью L_1 , которая при частоте питающего напряжения ω позволяет определить реактивное сопротивление обмотки $X_1 = j\omega L_1$. Первичная обмотка подключена к источнику синусоидального напряжения с частотой ω и амплитудой U_1 . Вторичная обмотка с соответствующими параметрами r_2 , L_2 , X_2 может быть подключена к нагрузке с комплексным сопротивлением Z_n . Напряжение на зажимах вторичной обмотки (на нагрузке, если она подключена) составляет U_2 . Далее во всех соотношениях будем применять комплексную форму представления переменных.

На рис. 3.4 схематично показан режим работы такого трансформатора с нагрузкой.

Отметим, что на холостом ходу в первичной обмотке протекает ток холостого хода \dot{I}_0 , который задает МДС $w_1 \dot{i}_0$ и формирует в магнитопроводе основной поток ϑ_0 . Этот поток наводит ЭДС индукции \dot{E}_1 . Закон Кирхгофа для первичной цепи имеет вид

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 + \dot{I}_0 X_1 + \dot{E}_1.$$

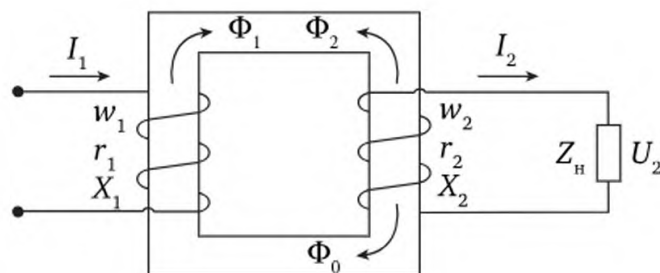


Рис. 3.4. Нагруженный трансформатор

В нагруженном режиме появляются два дополнительных противоположно направленных потока: поток ϑ_2 как реакция нагрузки за счет МДС $w_2 i_2$, и компенсирующий эту реакцию дополнительный поток ϑ_1 . Расчеты и эксперименты показывают, что $\vartheta_1 \approx -\vartheta_2$. Вследствие этого в нагруженном режиме обычно не учитывают основной поток ϑ_0 , и в упрощенном виде уравнения первичной и вторичной обмоток трансформатора принимают вид

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{I}_1 r_1 + \dot{I}_1 X_1 + \dot{E}_1; \\ \dot{U}_2 &= -\dot{I}_2 r_2 - \dot{I}_2 X_2 + \dot{E}_2.\end{aligned}\quad (3.1)$$

Таким образом, схема замещения нагруженного трансформатора принимает вид, показанный на рис. 3.5.

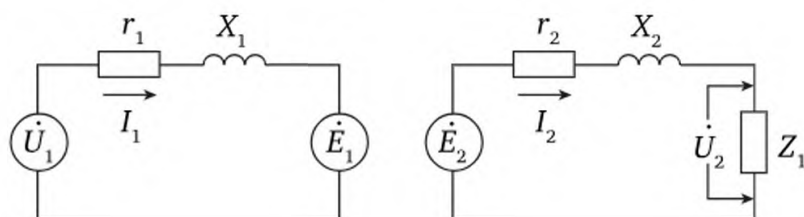


Рис. 3.5. Схема замещения нагруженного трансформатора

Для удобства расчетов параметры вторичной обмотки обычно приводят к первичной, освобождаясь при этом от использования в схеме ЭДС индукций \dot{E}_1 и \dot{E}_2 . В силу того, что в рассматриваемом режиме $w_1 i_1 = w_2 i_2$, вводится понятие коэффициента трансформации n , связывающего числа витков обмоток и комплексные значения переменных параметров схемы:

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2}. \quad (3.2)$$

Закон Кирхгофа для вторичной цепи

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 X_2 + \dot{I}_2 z_H, \quad (3.3)$$

где $z_H = r_H + X_H$.

Приведем выражение (3.3) к параметрам первичной цепи с использованием формулы (3.2):

$$\frac{\dot{E}_1}{n} = \dot{I}_1 n r_1 + \dot{I}_1 n X_1 + \dot{I}_1 n z_{\text{н}}.$$

Отсюда

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1 r'_2 + \dot{I}_1 X'_2 + \dot{I}_1 z'_{\text{н}}, \quad (3.4)$$

где $r'_2 = n^2 r_2$; $X'_2 = n^2 X_2$; $z'_{\text{н}} = n^2 z_{\text{н}}$ — приведенные к первичной обмотке значения активного и реактивного сопротивлений вторичной обмотки и комплексного сопротивления нагрузки. Подставив формулу (3.4) в первое уравнение (3.1), окончательно получаем:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 ((r_1 + r'_2 + r'_{\text{н}}) + j(X_1 + X'_2 + X'_{\text{н}})). \quad (3.5)$$

На рис. 3.6 представлена схема замещения трансформатора, построенная на основании выражения (3.5). Используя полученную схему замещения, можно определить ток в первичной обмотке трансформатора с учетом параметров вторичной обмотки:

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2 + r'_{\text{н}})^2 + (X_1 + X'_2 + X'_{\text{н}})^2}}. \quad (3.6)$$

Полученное соотношение (3.6) используется не только для анализа работы трансформаторов, но и для получения статических характеристики асинхронных двигателей, о чем сказано в п. 3.3.2.

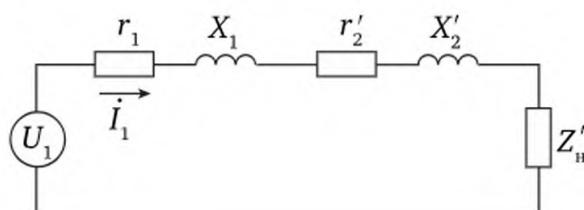


Рис. 3.6. Приведенная схема замещения нагруженного трансформатора

3.2. Электромашинные устройства автоматических систем

3.2.1. Классификация электрических машин

Электрические машины в составе САУ находят самое широкое распространение в качестве исполнительных двигателей, датчиков угловой скорости, датчиков угла поворота, измерителей рассогласования и т. д. Как правило, этот набор машин относят к так называемым микромашинам. Самой главной отличительной особенностью микромашин применительно к двигателям является их относительно невысокая мощность (до одного киловатта). При этом КПД

микромашин не является определяющим показателем в системах автоматики. Здесь на первый план выходят их статические и динамические свойства как элементов систем управления. Именно эти свойства и являются предметом рассмотрения в данном курсе.

В литературе существуют два подхода к классификации электрических машин. Исторически первой следует считать классификацию с разделением на машины постоянного и переменного тока. В последние годы стала доминировать классификация с разделением на машины с коллектором и без коллектора. На наш взгляд, обе эти классификации применительно к микромашинам для систем автоматики являются не совсем удобными, поэтому ниже предлагаются две классификации с разделением на машины на постоянном и переменном токе и разделением на двигатели и генераторы с включением тахогенераторов. Соответственно эти классификации представлены на рис. 3.7 и 3.8.



Рис. 3.7. Классификация электрических машин — двигателей

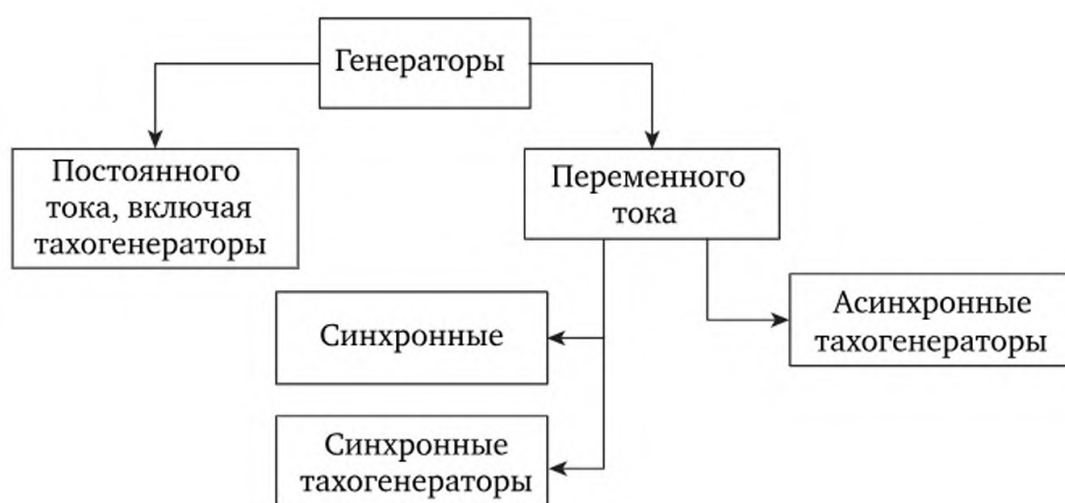


Рис. 3.8. Классификация электрических машин — генераторов и тахогенераторов

3.2.2. Машины постоянного тока

3.2.2.1. Устройство и общие вопросы функционирования

Рассмотрим принципы функционирования генератора и двигателя постоянного тока, закладываемые в их конструкцию.

Генератор. Пусть токопроводящая проволочная рамка, показанная на рис. 3.9, а, вращается внешним двигателем по часовой стрелке в постоянном магнитном поле Φ . Концы этой рамки прикреплены к токопроводящим коллекторным полукольцам, которые вращаются вместе с рамкой. В рамке при вращении будет наводиться ЭДС, которая фиксируется вольтметром (или осциллографом), подключаемым к щеткам, которые, в свою очередь, прижимаются к вращающемуся коллектору. Знаки ЭДС на концах рамки (на щетках) определяются с использованием правила правой руки. На рис. 3.9, б показана форма ЭДС на концах рамки (на щетках). Коллектор в данном случае играет роль выпрямителя.

Двигатель. Пусть та же токопроводящая проволочная рамка в постоянном магнитном поле Φ , показанная на рис. 3.9, а, подключена через щеточные контакты к внешнему источнику постоянного тока U . В этом случае по рамке протекает ток I . В соответствии с законом Ампера на стороны рамки, находящиеся в магнитном поле, будут действовать силы F , направление, которых определяется по правилу левой руки. За счет действия такой пары сил создается механический момент, график изменения которого во времени подобен графику изменения ЭДС на рис. 3.9, б, и рамка будет вращаться в одном направлении.

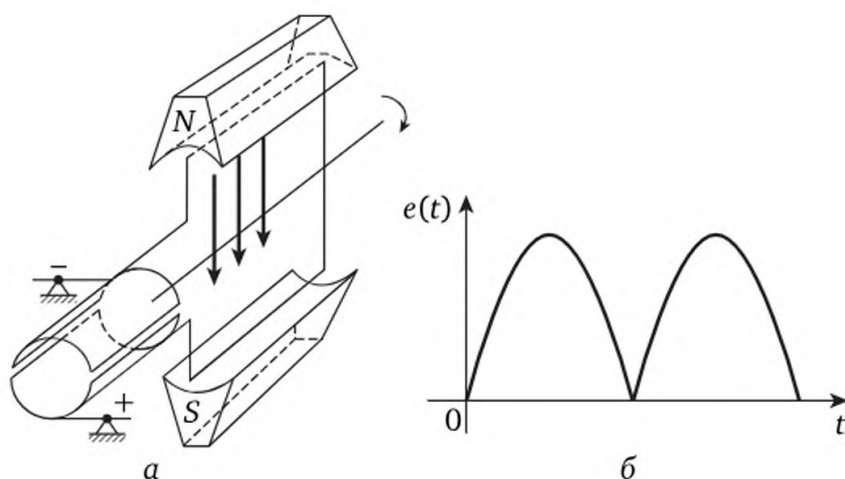


Рис. 3.9. Принцип работы генератора постоянного тока

Фактически по принципу действия одно и то же устройство в зависимости от внешних условий может выполнять функции, как генератора, так и двигателя. Именно подобный принцип и лежит в конструкции машин постоянного тока.

Конструкция машин постоянного тока. На рис. 3.10 представлена микромашина постоянного тока и отдельные ее составляющие: 1 — статор, 2 — ротор с коллектором и подшипниками, 3 — торцевые щиты (крышки), один из которых со щеточным механизмом, 4 — щетка, 5 — резьбовая пробка и контргайка для фиксации щетки снаружи двигателя.

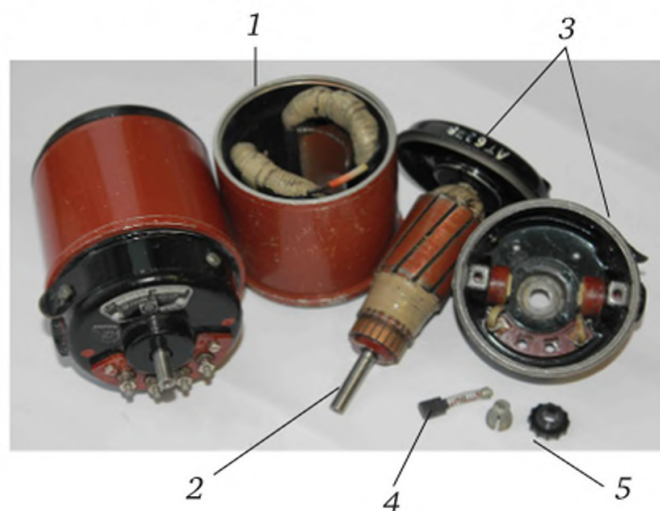


Рис. 3.10. Двигатель постоянного тока и составляющие его элементы

Рассмотрим эти составляющие подробнее.

Статор — цилиндр, который собран из металлических пластин (электротехническая сталь). Пластины специальным образом спекаются, и после дополнительной механической обработки статор приобретает нужную форму, что обеспечивает минимизацию потерь от вихревых токов при изменении магнитного поля. Внутри статора располагаются полюсные наконечники, на которых располагается обмотка, создающая внутри статора магнитное поле возбуждения. В ряде микромашин вместо полюсных наконечников для создания поля возбуждения наклеивают постоянные магниты. Тем самым машина освобождается от необходимости иметь источник тока для запитки обмотки возбуждения. Число пар полюсов на статоре в дальнейшем будем обозначать буквой p .

На рис. 3.10 представлена машина с одной парой полюсов ($p = 1$). Число пар полюсов для разных машин может иметь разные значения: $p = 1$, $p = 2$, $p = 3$ и т. д. В генераторах увеличение числа пар полюсов приводит к увеличению частоты пульсаций выходного напряжения, что упрощает их сглаживание, а в двигателях — меняет скорость вращения ротора, о чем речь пойдет далее.

Важной характеристикой статора является полюсное деление, которое определяется как $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ — длина дуги, соединяющей одноименные точки соседних полюсов (например, середины); D — диаметр окружности, касающейся внутренних поверхностей полюсов.

Ротор вместе с подшипниками, насаженными на общий вал, также показан на рис. 3.10. В машинах постоянного тока ротор часто называют *якорем*. Как и статор, сердечник ротора состоит из тонких пластин электротехнической стали, которые спекаются в единый пакет, а потом этот пакет проходит дополнительную механическую обработку с фрезерованием пазов, в которые укладывают обмотку. Для увеличения плавности хода двигателей пазы направлены не по образующим сердечника ротора, а скошены. На принципе работы машины это никак не сказывается. На рисунке показан коллектор с пластинами, к каждой из которых прикрепляются по два конца обмоток, укладываемых в определенные пазы. По способу укладки проводов обмотки в пазы различают два основных типа обмоток — *петлевую* и *волновую*.

Для ротора микромашины характерно отсутствие на валу крыльчатки вентилятора, способствующей более интенсивному отводу тепла из внутреннего объема машины.

Петлевая обмотка используется для машин, рассчитанных на относительно большие токи и относительно небольшие напряжения. На рис. 3.11, а показан фрагмент развертки так называемой простой петлевой обмотки ротора. На рисунке показаны также полюса статора. Обмотка состоит из последовательно соединенных секций, концы которых подсоединяются к соседним пластинам коллектора. Каждая секция может содержать от одного до нескольких витков обмотки. Активные части секции располагаются в пазах, отстоящих друг от друга на величину полюсного деления τ . Количество щеток в машинах с петлевой обмоткой ротора всегда равно числу полюсов машины ($2p$). Если машина имеет четыре полюса, то и щеток у такой машины должно быть четыре. Щетки равномерно распределены по окружности коллектора и через одну соединены электрически друг с другом, образуя в схеме замещения параллельные группы ветвей обмотки ротора. Каждая пара таких ветвей обозначается буквой a . Каждая ветвь обмотки содержит определенное число последовательно соединенных секций. Для такой обмотки характерным является условие равенства числа полюсов статора ($2p$) и числа параллельно соединенных ветвей обмоток ($2a$). Очевидно, что вся обмотка ротора, состоящая из N проводников во всех пазах ротора, представляет собой параллельное соединение из $2a$ ветвей общей обмотки. В свою очередь, каждая из этих ветвей

содержит $\frac{N}{2a}$ проводников.

Волновая обмотка. Фрагмент такой обмотки в упрощенном виде показан на рис. 3.11, б. Подобный тип обмотки используется для машин, рассчитанных на относительно небольшие токи и относительно большие напряжения. Для нее характерно равенство $2a = 2$, т. е. при любом числе полюсов число параллельных ветвей в схеме замещения всегда равно двум.

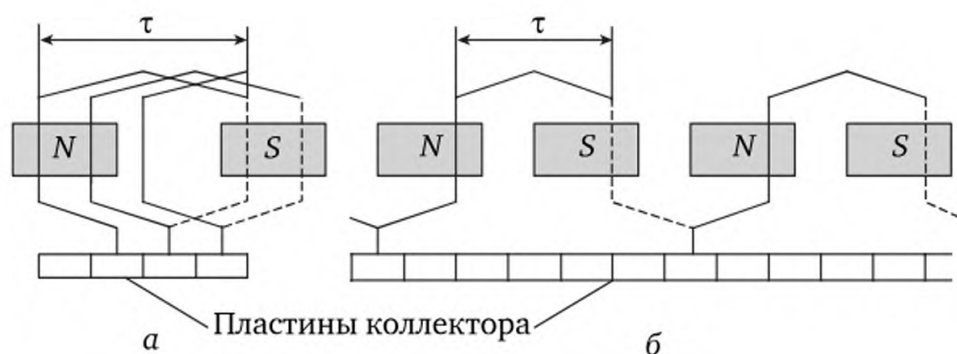


Рис. 3.11. Фрагменты разверток обмоток ротора:
а — простая петлевая; б — волновая

Щеточный механизм. На одном из торцевых щитов машины, помимо подшипника вала ротора, закрепляются прямоугольные колодцы из изоляционного материала, в которые погружаются угольно-графитовые щетки 4, показанные на рис. 3.10. Одной стороной они прижимаются к коллектору за счет сжатой пружины на другом конце щетки. Сжатие этой пружины регулируется специальной пробкой с резьбой, которая вворачивается в корпус направляющего колодца 5 (см. рис. 3.10). С этой же стороны к щетке прикрепляют гибкие токоподводы, противоположные концы которых электрически связаны с наружными зажимами на щите для внешнего подключения.

ЭДС генератора. Момент, создаваемый двигателем. Проведем параллельную оценку ЭДС, вырабатываемой машиной постоянного тока в генераторном режиме и механического момента, создаваемого ею в двигательном режиме. Такая параллельная оценка представлена в табл. 3.1.

Полученные результаты еще раз иллюстрирует обратимые свойства машин постоянного тока. Отметим, что при постоянном потоке возбуждения Φ получается пропорциональная связь между ЭДС генератора и частотой вращения ротора, а также между моментом создаваемым двигателем и током через ротор.

Варианты возбуждения машин постоянного тока. Различают четыре варианта возбуждения машин постоянного тока:

- 1) независимое возбуждение (от независимого источника постоянного тока либо с помощью постоянных магнитов, укрепляемых внутри статора);
- 2) последовательное возбуждение (в этом случае обмотки ротора и статора соединяются последовательно и подключаются к источнику управляющего напряжения);
- 3) параллельное возбуждение (в этом случае обмотки ротора и статора соединяются параллельно и подключаются к источнику управляющего напряжения);

4) смешанное возбуждение (в этом случае обмотка возбуждения состоит из двух частей, одна из которых соединяется параллельно с обмоткой ротора, а другая соединена с ними последовательно, и вся эта конструкция подключается к источнику управляющего напряжения).

Таблица 3.1

Параллельная оценка ЭДС генератора и механического момента двигателя

<p>ЭДС на концах движущегося со скоростью v в магнитном поле с индукцией B проводника длиной l</p> $e = lvB = lv \frac{\Phi}{s}.$ <p>Поскольку $s = l\tau = l \frac{\pi D}{2p}$, а $v = \omega \frac{D}{2}$, то</p> $e = \frac{p}{\pi} \omega \Phi.$ <p>Если общее число проводников в пазах ротора N, то ЭДС генератора будет</p> $E = \frac{N}{2a} e = \frac{p}{2a\pi} \Phi \omega = k \Phi \omega,$ <p>где коэффициент $k = \frac{p}{2a\pi}$ определяется конструкцией машины.</p> <p>Если $\Phi = \text{const}$, то $k\Phi = c = \text{const}$, то ЭДС генератора</p> $E = k\Phi \omega = c\omega$	<p>Сила, действующая на проводник длиной l в магнитном поле с индукцией B, с током i</p> $f = liB = li \frac{\Phi}{s}.$ <p>Момент, который он создает,</p> $m = li \frac{\Phi D}{2}.$ <p>Поскольку $s = l\tau = l \frac{\pi D}{2p}$, то $m = \frac{p}{\pi} \Phi i$.</p> <p>С учетом этого ток через проводник в двигателе выражается через общий ток в виде $i = \frac{I_{\text{дв}}}{2a}$. Момент двигателя от N проводников будет</p> $M_{\text{дв}} = Nm = \frac{p}{2a\pi} \Phi I_{\text{дв}} = k \Phi I_{\text{дв}}.$ <p>Если $\Phi = \text{const}$, то $k\Phi = c = \text{const}$, то механический момент двигателя</p> $M_{\text{дв}} = k \Phi I_{\text{дв}} = c I_{\text{дв}}$
---	--

Для целей управления предпочтительным является независимое возбуждение. Здесь возможны два варианта. *Якорное* (роторное) управление используется при фиксированном токе возбуждения, которое обеспечивает линейность характеристик двигателя в случае управления током ротора. Именно этот способ возбуждения рассматривается далее более подробно. Гораздо реже применяется *полюсное* управление (током возбуждения) при питании якорной (роторной) обмотки от внешнего нерегулируемого источника. Остальные способы возбуждения используются чаще для стационарных (нерегулируемых) режимов работы двигателей. Следует отметить, что параллельное возбуждение позволяет работать двигателю постоянного тока и на переменном токе (вся бытовая техника использует в основном двигатели постоянного тока).

3.2.2.2. Генераторы, тахогенераторы

Рассмотрим основной принцип управления генератором постоянного тока с независимым возбуждением. Целью управления является

регулирование напряжения $U_{\text{ген}}$ на сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$ за счет регулирования тока возбуждения $I_{\text{в}}$. В упрощенном виде (без учета магнитных потерь) схема управления и схема замещения генератора для стационарного режима представлены на рис. 3.12, а и б. Стационарный режим здесь и далее в курсе подразумевает установившиеся значения входных и выходных параметров машины по окончании переходных процессов. Здесь предполагается постоянство угловой скорости вращения ротора генератора. Известным является сопротивление обмотки ротора (якоря) генератора $r_{\text{я}}$. Ток возбуждения, а следовательно, и поток возбуждения Φ регулируются реостатом $R_{\text{у}}$.

Напряжение на нагрузке определяется зависимостью

$$U_{\text{ген}} = U_{\text{н}} = I_{\text{я}} R_{\text{н}} = \frac{k\Phi\omega}{r_{\text{я}} + R_{\text{н}}} R_{\text{н}}.$$

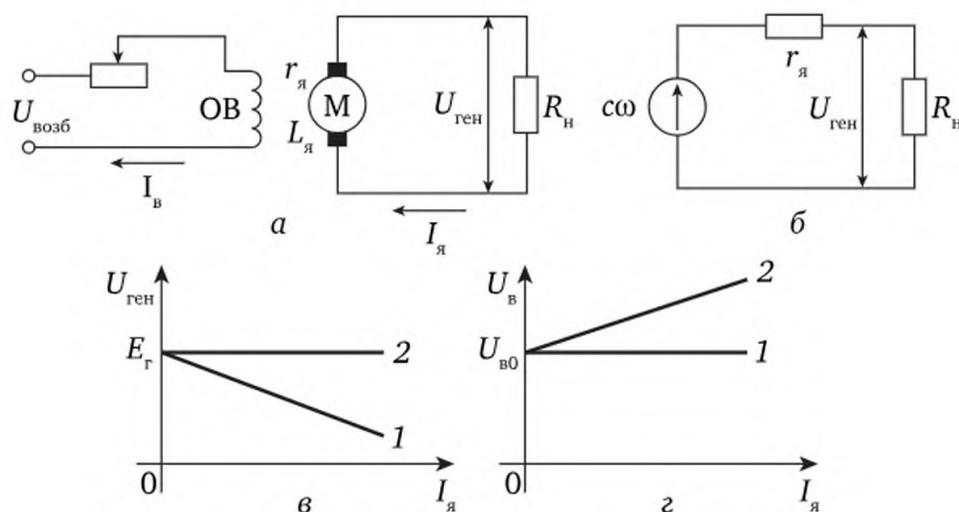


Рис. 3.12. Схема управления (а) и схема замещения управляемого генератора (б), нагрузочные (в) и регулировочные характеристики (г)

На графиках нагрузочных и регулировочных характеристик рис. 3.12, в и г представлено два случая. В первом случае ток возбуждения генератора фиксирован, и наблюдается падение напряжения на нагрузке с ростом тока нагрузки. Во втором случае демонстрируется возможность стабилизации напряжения на нагрузке при изменении тока нагрузки за счет увеличения напряжения на обмотке возбуждения в зависимости от тока нагрузки. При этом растет ток возбуждения и, следовательно, — поток возбуждения Φ .

Тахогенераторы постоянного тока. Тахогенераторы — это генераторы постоянного тока, работающие на высокоомную нагрузку. Они используются в качестве датчиков угловой скорости. У тахогенератора постоянное (независимое) возбуждение ($c = k\Phi = \text{const}$).

Схема замещения якорной цепи тахогенератора с учетом индуктивности обмотки якоря $L_{\text{я}}$ и активного сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$

представлена на рис. 3.13. Определим передаточную функцию тахогенератора. Выходным параметром будет являться напряжение на нагрузке $U_{\text{тг}}$, а входным — угловая скорость ротора ω .

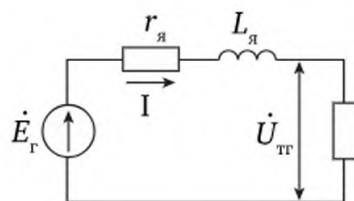


Рис. 3.13. Схема замещения якорной цепи тахогенератора

Система уравнений, описывающая процессы в якорной цепи тахогенератора, имеет вид

$$\begin{aligned} c\omega &= r_{\text{я}}I + L_{\text{я}} \frac{dI}{dt} + U_{\text{тг}}; \\ U_{\text{тг}} &= IR_{\text{н}}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Исключив из формулы (3.7) ток как промежуточный параметр, получаем уравнение

$$c\omega = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{н}}} \frac{dU_{\text{тг}}}{dt} + \frac{r_{\text{я}} + R_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} U_{\text{тг}}.$$

Перейдя к преобразованию Лапласа, получаем:

$$U_{\text{тг}}(p) = \frac{K_{\text{тг}}}{T_{\text{тг}}p + 1} \omega(p),$$

где $K_{\text{тг}} = \frac{cR_{\text{н}}}{r_{\text{я}} + R_{\text{н}}}$, $T_{\text{тг}} = \frac{L_{\text{я}}}{r_{\text{я}} + R_{\text{н}}}.$

Таким образом, передаточная функция тахогенератора является инерционным (апериодическим) звеном первого порядка. На практике при обеспечении высокоомной нагрузки ($R_{\text{н}} \gg r_{\text{я}}$) постоянной времени тахогенератора можно пренебречь. Тахогенератор можно считать безынерционным звеном с $K_{\text{тг}} = c$, т. е. $U_{\text{тг}} = c\omega$.

Существуют специальные серии двигателей постоянного тока со встроенными тахогенераторами, которые используются в системах управления (так как с их помощью можно контролировать частоту вращения ротора и использовать этот сигнал в управляющих алгоритмах). Габариты встроенного тахогенератора обычно невелики.

3.2.2.3. Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением при якорном управлении

На практике скоростью двигателя, меняя ток якоря при неизменном потоке возбуждения, управляют двумя способами. Первый

способ связан с изменением сопротивления добавочного резистора (реостата), включаемого последовательно в якорную цепь. Источник напряжения, питающего якорную цепь, имеет фиксированное значение. Этот способ довольно широко распространен для управления скоростью двигателей большой мощности (например, в электрическом транспорте). Второй способ связан с использованием регулируемого источника напряжения, питающего якорную цепь. Этот способ в основном используется для управления микромашинами автоматических систем.

Рассмотрение обоих способов начнем с описания динамики двигателя постоянного тока при якорном управлении, схема которого показана на рис. 3.14.

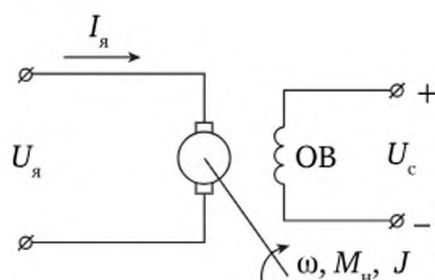


Рис. 3.14. Схема двигателя с независимым возбуждением

Необходимо найти математическое описание работы двигателя как функционального элемента системы управления. При этом выходной величиной должна являться угловая скорость вращения вала двигателя ω , а входными величинами — напряжение управления (прикладывается к якорной цепи) $U_я$ и момент сопротивления нагрузки на валу двигателя $M_н$. Обмотка возбуждения ОВ подключена к источнику постоянного тока $U_с$. Считается известным общий момент инерции J , определяемый моментом инерции самого ротора двигателя и нагрузкой на его валу. Обмотка ротора характеризуется активным сопротивлением $r_я$ и индуктивностью $L_я$.

Рассмотрим систему уравнений (3.8), описывающих динамику двигателя:

$$\begin{aligned} U_я &= L_я \frac{dI_я}{dt} + r_я I_я + c\omega; \\ M_{дв} &= cI_я; \\ M_{дв} &= J \frac{d\omega}{dt} + M_\sigma + M_н. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Первое уравнение динамики двигателя — это закон Кирхгофа для якорной цепи двигателя. В данном уравнении слагаемое $c\omega$ — это противоЭДС, которая генерируется вращающимся ротором двигателя как генератором. Второе уравнение динамики — момент,

развиваемый двигателем. Третье уравнение динамики — баланс моментов на валу двигателя.

В третьем уравнении первое слагаемое $J \frac{d\omega}{dt}$ — динамический момент, второе слагаемое (M_σ) — собственный момент потерь из-за трения в коллекторном узле и подшипниках, третье — момент нагрузки (M_H). Более полно динамический момент можно определить с использованием понятия «кинетическая энергия вращающегося тела». Это понятие позволяет определить динамический момент как момент, связанный с ускоренным вращением тела. В самом деле, кинетическая энергия вращающегося тела — $A = J \frac{\omega^2}{2}$.

Производная этой энергии определяет динамическую мощность

$$P_d = M_d \omega = \frac{dA}{dt} = J \frac{d\omega}{dt} \omega + \frac{dJ}{dt} \frac{\omega^2}{2}.$$

На практике в системах управления изменяющийся момент инерции нагрузки J встречается не так часто, поэтому в дальнейшем для сокращения записей динамический момент будем записывать в виде

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Момент нагрузки на валу двигателя M_H — статический, разной природы (в том числе и момент сил сухого трения, вязкого трения и т. д.). При неизменном знаке скорости вращения ротора двигателя ω этот момент в большинстве случаев удастся описать аналитически.

Уравнения статики для двигателя получаются из (3.8) путем приравнивания нулю слагаемых с производными переменных.

$$\begin{aligned} U_\gamma &= r_\gamma I_\gamma + c\omega; \\ M_{дв} &= cI_\gamma; \\ M_{дв} &= M_\sigma + M_H. \end{aligned} \tag{3.9}$$

Используя формулы (3.9), получаем статическую зависимость между входными параметрами двигателя и частотой вращения его ротора:

$$\omega = \frac{1}{c} U_\gamma - \frac{r_\gamma}{c^2} (M_\sigma + M_H) = K_{дв} U_\gamma - K_M (M_\sigma + M_H). \tag{3.10}$$

Полученное соотношение (3.10) позволяет построить механические (нагрузочные) и регулировочные статические характеристики двигателя, показанные на рис. 3.15.

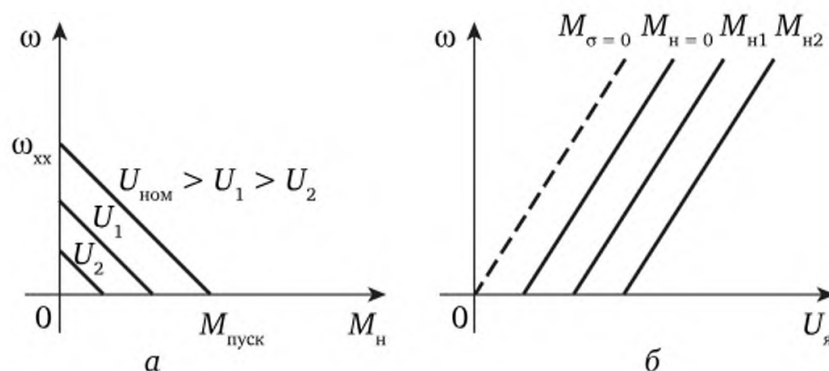


Рис. 3.15. Статические характеристики двигателя:
а — механическая (нагрузочная); б — регулировочная

На этих характеристиках $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение на якоре двигателя, скорость холостого хода $\omega_{\text{хх}} = K_{\text{дв}} U_{\text{ном}} - K_{\text{м}} M_{\sigma}$, пусковой момент

$$M_{\text{пуск}} = \frac{c}{r_{\text{я}}} U_{\text{ном}} - M_{\sigma}.$$

Линейность статических характеристик является основным достоинством двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и с управлением по якорной цепи.

Управление частотой вращения ротора двигателя путем введения в якорную цепь добавочных резисторов или реостата широко используется в электрическом транспорте. Такое управление базируется на увеличении крутизны наклона механической характеристики с увеличением сопротивления в цепи якоря. На рис. 3.16 приведена схема двигателя с тремя добавочными резисторами. В положении 1 верхнего переключателя в цепи якоря будет максимальное значения сопротивления в виде суммы сопротивлений трех добавочных резисторов, в положении 4 — все добавочные резисторы закорочены.

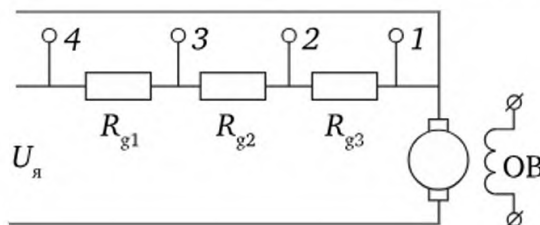


Рис. 3.16. Схема двигателя с тремя добавочными резисторами:
 R_{gi} — добавочный резистор

Рассмотрим пусковой режим двигателя. Для плавного включения (запуска) двигателя и ограничения пускового тока применяют реостатное включение (реостатный пуск). Согласно формулам (3.9)

пусковой ток $I_{\text{пуск}}$ при наличии добавочных резисторов и $\omega = 0$ оценивается как

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{я}}}{r_{\text{я}} + \sum R_{gi}}.$$

Пусковой режим двигателя показан на рис. 3.17. Здесь представлены четыре механические характеристики двигателя для разных положений переключателя на схеме рис. 3.16. В положении 1 все дополнительные резисторы введены, и разгон идет по прямой 1 до скорости ω_1 . При этом пусковой ток и момент не превышают заданных величин.

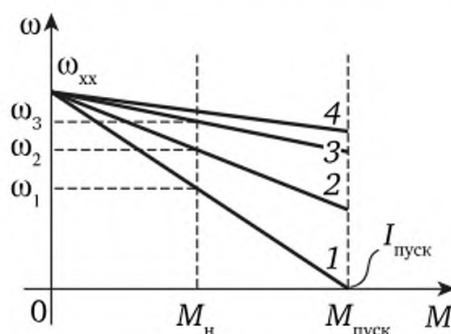


Рис. 3.17. Пусковой режим двигателя

Далее переключатель переводят в положение 2. При этом шунтируется добавочный резистор с номером 3. Происходит увеличение скорости до значения ω_2 (по статической характеристике 2).

Затем переключатель переводят в положение 3. Разгоняют двигатель до скорости ω_3 и так далее, пока не будут зашунтированы все добавочные резисторы. При этом ток в цепи якоря не превысит предельно допустимого значения $I_{\text{пуск}}$.

При управлении скоростью двигателя путем изменения величины сопротивления якорной цепи определяют *тормозной режим* как режим ограничения скорости при различных действующих моментах нагрузки и их знаках. Выделяют следующие тормозные режимы:

- 1) рекуперативное торможение;
- 2) торможение противовключением;
- 3) динамическое торможение.

Рекуперативное торможение поясняется рис. 3.18. Здесь изменение величины и знака момента нагрузки с $M_{н1}$ на $M_{н2}$ не приводит к неограниченному росту скорости, так как двигатель переходит в генераторный режим и начинает отдавать энергию в сеть. При этом появляется новая точка равновесия при $\omega_{\text{дв}} = \omega_2$.

В уравнении якорной цепи напряжение противоЭДС становится больше напряжения, подводимого к якорю, и ток якоря поменяет свое направление, так как

$$U_{\text{я}} = r_{\text{я}} I + c\omega, \text{ но } c\omega \gg U_{\text{я}}.$$

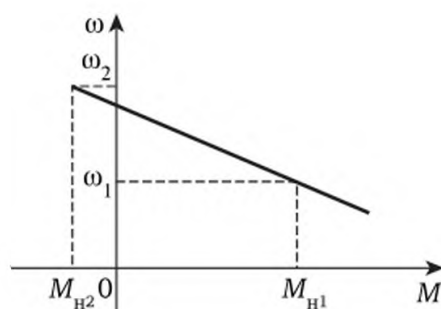


Рис. 3.18. Режим рекуперативного торможения

В режиме «противовключения» изменение величины и знака скорости с ω_1 на ω_2 при фиксированном внешнем моменте происходит за счет введения в цепь якоря добавочного резистора, как показано на рис. 3.19.

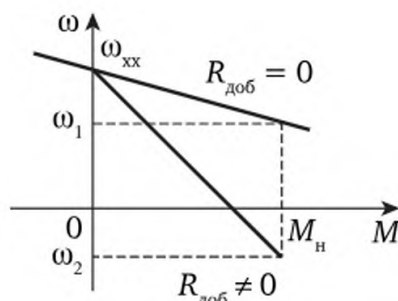


Рис. 3.19. Режим «противовключения»

Режим динамического торможения поясняется рис. 3.20.

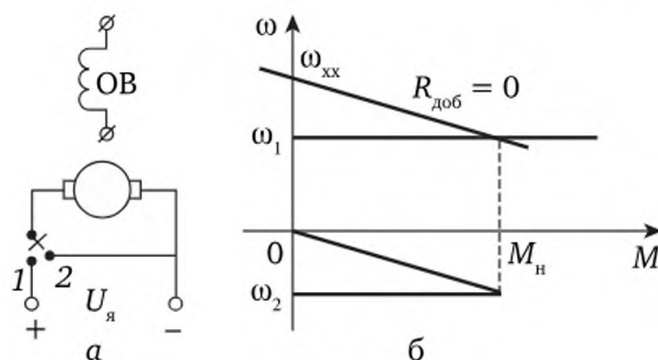


Рис. 3.20. Режим динамического торможения:

а — электрическая схема; б — механические характеристики

В положении 1 переключателя, показанного на рис. 3.20, осуществляется нормальный режим работы двигателя от источника $U_{я}$. В соответствии с механической характеристикой, определяемой соотношением $U_{я} = r_{я}I + c\omega$, скорость вращения ротора будет ω_1 . В положении 2 переключателя осуществляется режим динамического торможения (цепь якоря закорачивается). В этом случае

$0 = r_{\text{я}}I + c\omega$, и ротор двигателя будет вращаться в противоположную сторону со скоростью ω_2 .

Управление частотой вращения ротора двигателя путем регулирования напряжения питания якорной цепи. Подобное управление в основном реализуется в замкнутых САУ с микромашинами в силу определенных трудностей в технической реализации управляемых источников ЭДС постоянного тока большой мощности. Следует отметить, что развитие современной силовой электроники в последние годы позволяет создавать такие источники, однако в САУ большой мощности происходит переориентация на использование исполнительных двигателей переменного тока. Такие двигатели дешевле и более надежны. О них пойдет речь в п. 3.2.3.1 и 3.2.3.2, где речь идет об асинхронных двигателях.

В силу того, что рассматриваемое управление реализуется чаще всего для замкнутых САУ, определим передаточную функцию и структурную схему двигателя постоянного тока как элемента системы управления. Для этого используем систему уравнений динамики двигателя постоянного тока (3.8). Исключая из этой системы уравнений промежуточные переменные $I_{\text{я}}, \frac{dI_{\text{я}}}{dt}$ и считая постоянной величиной момент потерь M_{σ} (если, например, знак скорости вращения ω не меняется), получаем дифференциальное уравнение второго порядка, связывающее скорость вращения ротора ω и входные переменные: напряжение, прикладываемое к якорной цепи $U_{\text{я}}$, и момент нагрузки $M_{\text{н}}$:

$$U_{\text{я}} = \frac{r_{\text{я}}}{c} \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{н}} + M_{\sigma} \right) + \frac{L_{\text{я}}}{c} \left(J \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{dM_{\text{н}}}{dt} \right) + c\omega.$$

Это уравнение в изображениях по Лапласу имеет вид

$$(T_{\text{э}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1)\omega(p) = K_{\text{дв}}U_{\text{я}}(p) - K_{\text{м}}((T_{\text{э}}p + 1)M_{\text{н}} + M_{\sigma}),$$

где $T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{r_{\text{я}}}$ — электромагнитная постоянная времени; $T_{\text{м}} = T_{\text{дв}} = \frac{Jr_{\text{я}}}{c^2}$ — электромеханическая постоянная времени, или просто «постоянная времени двигателя»; $K_{\text{дв}} = \frac{1}{c}$ — коэффициент передачи двигателя; $K_{\text{м}} = \frac{r_{\text{я}}}{c^2}$ — коэффициент передачи двигателя по моменту.

На практике $T_{\text{э}} \ll T_{\text{дв}}$, поэтому обычно электромагнитной постоянной времени пренебрегают. В этом случае изображение скорости принимает вид

$$\omega(p) = \frac{K_{\text{дв}}U_{\text{я}}(p) - K_{\text{м}}[M_{\text{н}}(p) + M_{\sigma}]}{T_{\text{дв}}p + 1}. \quad (3.11)$$

Отметим, что числитель в выражении (3.11) полностью совпадает со статической характеристикой (3.10). Соотношению (3.11) соответствует структурная схема, показанная на рис. 3.21, которая содержит инерционное и интегрирующее звенья. Выход инерционного звена описывается соотношением (3.11). В случае если необходимо получить информацию об угле поворота вала ротора $\varphi(p)$, в структуру вводится дополнительное интегрирующее звено.

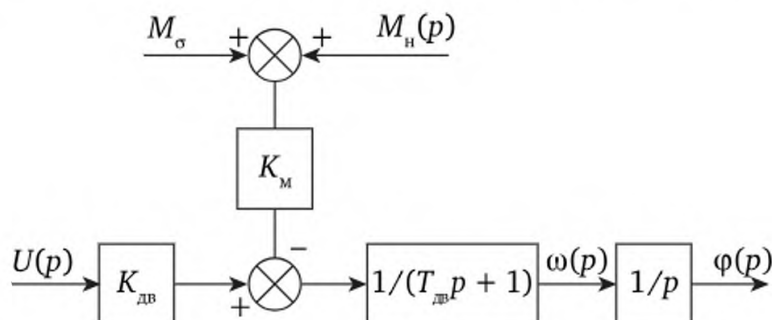


Рис. 3.21. Структурная схема двигателя постоянного тока при якорном управлении

На рис. 3.22 показаны переходные процессы изменения скорости вращения и угла поворота ротора при нулевых начальных условиях. Напряжение U на якорную цепь подается скачком в нулевой момент времени, а в промежуточный момент времени t_1 скачком изменяется на определенную величину момент нагрузки.

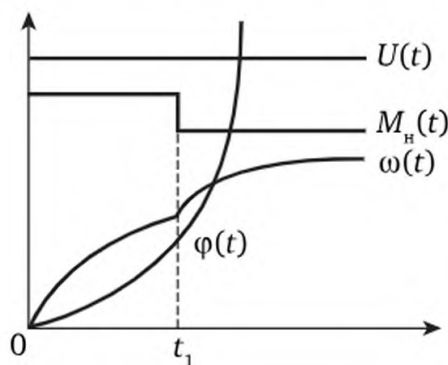


Рис. 3.22. Переходные процессы изменения скорости вращения и угла поворота ротора

3.2.2.4. Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением при полюсном управлении

Реализация рассмотренного выше варианта якорного управления для двигателей постоянного тока большой мощности с независимым возбуждением затруднена из-за необходимости осуществлять управление путем изменения относительно больших значений тока якоря. Подобных затруднений нет при полюсном управлении, когда

управление осуществляется путем изменения потока возбуждения машины Φ . Регулирование потока возбуждения осуществляется относительно невысокими токами возбуждения I_B . Однако такое управление сопровождается рядом недостатков, которые необходимо учитывать при его реализации в САУ.

Будем считать, что для ненасыщенного магнитопровода машины поток возбуждения пропорционален току возбуждения (см. таблицу 3.1).

$$k\Phi = \frac{Np}{2a\pi} \Phi = k_1 I_B.$$

Тогда система уравнений, описывающая динамику двигателя, в отличие от (3.8), будет иметь вид

$$\begin{aligned} U_{\text{я}} &= L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + r_{\text{я}} I_{\text{я}} + k\Phi \omega = L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + r_{\text{я}} I_{\text{я}} + k_1 I_B \omega; \\ M_{\text{дв}} &= k\Phi I_{\text{я}} = k_1 I_B I_{\text{я}}; \\ M_{\text{дв}} &= J \frac{d\omega}{dt} + M_{\sigma} + M_{\text{н}}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Проведем анализ механических характеристик двигателя. Приравняв нулю в формулах (3.12) производные переменных, получаем систему уравнений статики двигателя:

$$\begin{aligned} U_{\text{я}} &= r_{\text{я}} I_{\text{я}} + k_1 I_B \omega; \\ M_{\text{дв}} &= k_1 I_B I_{\text{я}}; \\ M_{\text{дв}} &= M_{\sigma} + M_{\text{н}}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Не нарушая общности, будем считать $M_{\sigma} = 0$. Определим зависимость частоты вращения ротора двигателя ω от тока возбуждения I_B и момента $M_{\text{дв}} = M_{\text{н}}$. Совместно решая первые два уравнения (3.13), получаем искомую зависимость

$$\omega = \frac{k_1 U_{\text{я}} I_B - r_{\text{я}} M_{\text{н}}}{k_1^2 I_B^2}. \quad (3.14)$$

Получившаяся зависимость (3.14) имеет нелинейный характер. Исследуем ее на наличие особых точек и экстремума. Особая точка, очевидно — $I_B = 0$. Приравнявая нулю частную производную $\frac{\partial \omega}{\partial I_B} = 0$, получаем координаты экстремума

$$I_{\text{вз}} = \frac{2r_{\text{я}} M_{\text{н}}}{k_1 U_{\text{я}}} \text{ и } \omega_{\text{э}} = \frac{U_{\text{я}}^2}{4r_{\text{я}} M_{\text{н}}}.$$

На рис. 3.23 представлены механические характеристики двигателя на основании формулы (3.14) для разных значений момента нагрузки.

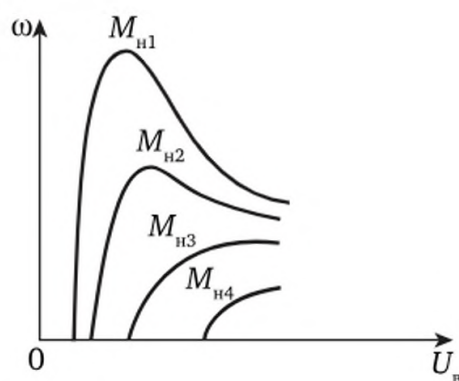


Рис. 3.23. Механические характеристики двигателя при полюсном управлении

Полученные механические характеристики имеют экстремумы, смещающиеся с ростом момента нагрузки в сторону увеличения тока возбуждения. При этом сами экстремумы уменьшаются. Очевидно, что подобное управление непригодно для использования в следящих системах, когда частота вращения ротора двигателя располагается в окрестности нулевой точки. Подобное управление находит применение в системах стабилизации частоты вращения двигателя. Однако здесь особую сложность представляет режим включения системы. Для избежания потери устойчивости во время разгона двигателя отключается обратная связь системы, а двигатель разгоняют с подключением нагрузки. Обратную связь включают после набора двигателем скорости, близкой к требуемой согласно уставке. Такой сценарий разгона необходим, так как до точки экстремума механическая характеристика имеет другой знак наклона и замкнутая система для этого района скорости и тока возбуждения будет иметь положительную обратную связь.

Так же как и при якорном управлении, передаточная функция двигателя при полюсном управлении содержит две постоянные времени: электромагнитную $T_э = \frac{L_я}{r_я}$ и механическую $T_м = \frac{Jr_я}{k_1^2 I_B^2}$. При полюсном управлении пренебрегать $T_э$ во многих вариантах изменения входных параметров нельзя, обе постоянные времени становятся сравнимыми.

3.2.2.5. Принципы управления двигателями постоянного тока

Сравнение разных способов управления исполнительными двигателями показывает преимущество якорного управления двигателем при независимом возбуждении. Однако этот способ управления нуждается в мощном усилителе, позволяющем регулировать в широких пределах относительно большие токи якоря. С середины XX в. в качестве такого усилителя повсеместно применялся электромашинный усилитель (ЭМУ). По существу ЭМУ — это управляемый

генератор постоянного тока, приводимый во вращение с постоянной скоростью внешним двигателем. Генератор и приводной двигатель встраивались в единый корпус. ЭМУ изготавливались на различные предельные мощности управления и обладали хорошими статическими характеристиками. Однако большой вес и габариты этих усилителей, ограниченный моторесурс механических элементов, наличие коллектора и щеточных контактов постепенно привели к вытеснению ЭМУ другими типами усилителей. К ним следует отнести магнитные и электронные усилители мощности.

Магнитные усилители, принцип работы которых рассматривается в п. 3.2.3.3, являются надежными и удобными в эксплуатации устройствами. Вместе с тем они обладают заметной инерционностью при совместной работе с якорной цепью двигателя. Постоянная времени магнитного усилителя приблизительно равна сумме постоянных времени всех обмоток управления и смещения. Число таких обмоток для реверсивного магнитного усилителя постоянного тока достаточно велико, поэтому дополнительная постоянная времени оказывается сравнимой с постоянной времени самого двигателя, что отражается на динамике САУ.

С появлением мощных тириستоров, а затем силовых транзисторов были разработаны компактные и надежные усилители мощности для регулировки тока в якорной цепи двигателей постоянного тока. Наибольшее распространение в итоге получили усилители мощности на силовых транзисторах.

Силовая часть этих усилителей, показанная на рис. 3.24, строится по мостовой схеме.

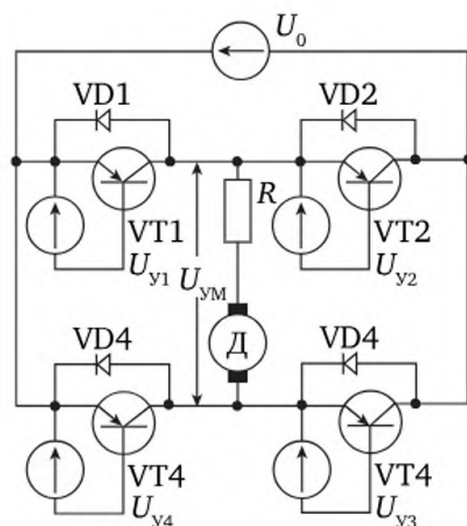


Рис. 3.24. Принципиальная схема силового блока ШИМ

Одна диагональ моста из транзисторов VT1—VT4 подключается к источнику постоянного напряжения U_0 , а к другой диагонали подключена цепь якоря с добавочным резистором для ограничения

пускового тока. Вращение ротора двигателя в одну сторону осуществляется одновременным открытием транзисторов VT1 и VT3, а в другую — одновременным открытием VT2 и VT4. В последнем случае ток, протекающий через якорь, поменяет свое направление. Транзисторы моста работают в ключевом режиме.

Регулирование среднего тока, протекающего через цепь якоря, осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При такой модуляции ширина управляющих импульсов (при фиксированной амплитуде и частоте следования импульсов) пропорциональна мгновенному значению управляющего сигнала на момент формирования импульса. Частота следования импульсов делается достаточно высокой с тем, чтобы, благодаря инерционности двигателя с учетом нагрузки, импульсный характер движения вала ротора был бы практически незаметен.

На рис. 3.25 показаны: результирующий ток через нагрузку или ток якоря (а) при постоянной скорости вращения ротора, а также токи через транзисторы (б) и обратные шунтирующие диоды VD (в). Эти диоды обеспечивают рассасывание запасенной энергии в индуктивности якоря при закрывании транзистора и тем самым защищают его от пробоя.

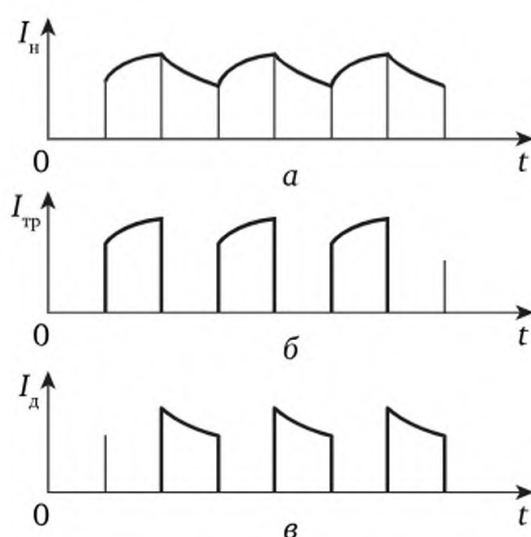


Рис. 3.25. Ток через нагрузку (а) и токи через транзистор (б) и обратный диод (в) при постоянной скорости вращения ротора

Схема управления для силового блока ШИМ рассматривается в п. 4.3.2.

3.2.3. Машины переменного тока

3.2.3.1. Устройство и общие вопросы функционирования

Принцип функционирования генератора переменного тока, закладываемый в его конструкцию, поясняется рис. 3.26. Рассмотрим вра-

щение токопроводящей проволочной рамки в постоянном магнитном поле. Концы этой рамки прикреплены к токопроводящим коллекторным кольцам, которые вращаются вместе с рамкой. В рамке при вращении будет наводиться ЭДС, которая фиксируется вольтметром (или осциллографом), подключаемым к щеткам, которые, в свою очередь, прижимаются к вращающимся коллекторным кольцам. Знаки ЭДС на концах рамки (на щетках) определяются с использованием правила правой руки. Заметим, что, когда рамка переворачивается на 180° от первоначального положения, показанного на рисунке, знак ЭДС меняется на противоположный. Равномерное вращение рамки приводит к выработке переменной ЭДС. Частота, вырабатываемой ЭДС (f) пропорциональна частоте вращения рамки (ω):

$$f = \frac{\omega p}{2\pi},$$

где p — число пар полюсов, формирующих поле возбуждения.

Фактически мы получаем синхронный генератор. На практике в генераторах переменного тока функционально ротор и статор меняются местами. Поток возбуждения реализуется ротором, а ЭДС снимается со статора. Статор в машинах переменного тока часто называют якорем. В такой конструкции токовая нагрузка на коллекторные кольца ротора существенно ниже. Важно отметить, что при этом внутри статора образуется вращающееся магнитное поле. Именно этот фактор является основным отличительным признаком машин переменного тока, как генераторов, так и двигателей.

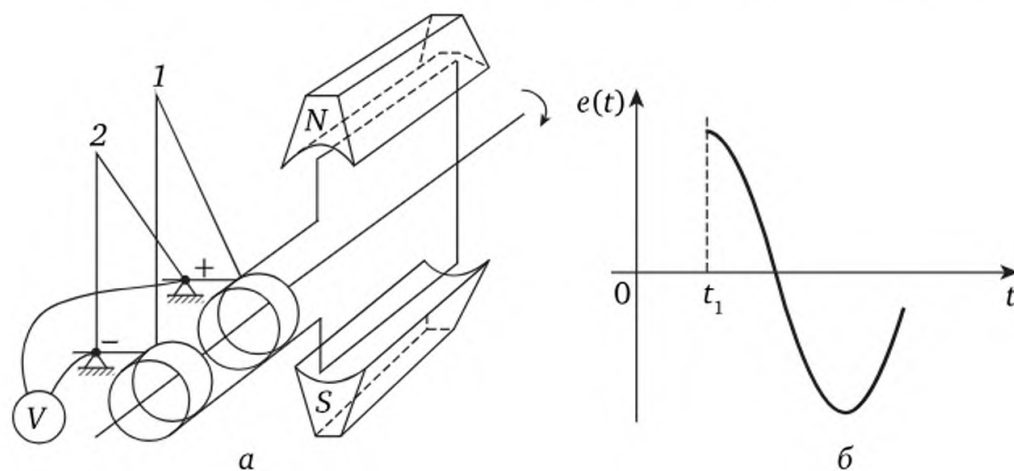


Рис. 3.26. Принцип работы синхронного генератора

Электрические машины переменного тока можно разделить на две группы — асинхронные и синхронные. У асинхронных машин частота вращения ротора несколько ниже частоты вращения магнитного поля внутри статора, а у синхронных машин эти частоты принципиально равны друг другу.

Конструктивные особенности машин переменного тока. Основными элементами конструкции машин переменного тока являются статор и ротор, причем принципы исполнения конструкции статоров для синхронных и асинхронных машин совпадают как для генераторов, так и для двигателей. В конструкциях роторов для синхронных и асинхронных машин существуют различия.

Конструкции статоров. Магнитопровод статора машин переменного тока, как и для машин постоянного тока, выполняют с использованием пластин тонкой электротехнической стали. В корпусе статора по образующим сверлят каналы, в которые укладывают витки обмотки. Обмотки статора могут быть сосредоточенными и распределенными.

На рис. 3.27 показано схематичное расположение трехфазной сосредоточенной обмотки на статоре синхронного генератора. На этом рисунке, например, символами A_n и A_k обозначены начало и конец фазной обмотки А. В такой обмотке в генераторном режиме работы машины (например, при вращении внешним двигателем ротора в виде постоянного магнита с одной парой полюсов) наводится ЭДС с формой, отличной от синусоидальной. Синусоидальную форму наводимой ЭДС обеспечивают специальными скосами полюсных наконечников в сочетании с распределенной конструкцией обмотки.

Если по периметру статора расположить три таких обмотки (А, В и С), сдвинутые друг относительно друга на 120° , как это показано на рис. 3.27, а, то подобная машина в генераторном режиме будет вырабатывать три ЭДС, сдвинутые в относительном времени (ωt) друг по отношению друга на 120° . На рис. 3.27, б показано соединение таких обмоток «звездой». Подобная машина является трехфазным синхронным генератором.

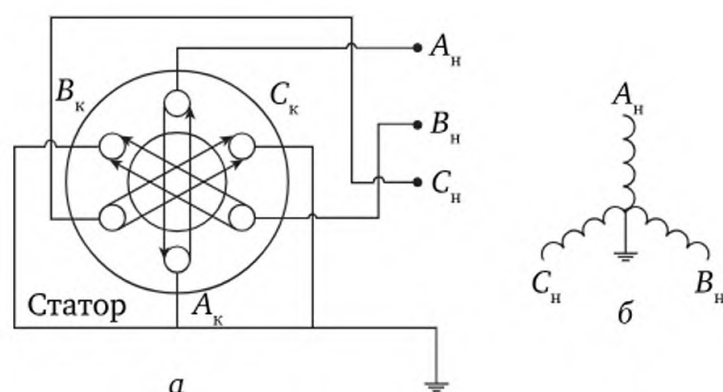


Рис. 3.27. Расположение сосредоточенных обмоток на статоре трехфазного синхронного генератора (а) и схема соединения обмоток «звездой» (б)

В двигательном режиме статор подобной электрической машины подключают к трехфазной промышленной сети, и тогда внутри

статора образуется круговое вращающееся поле. Токи в обмотках статора и пропорциональные им магнитные потоки соответствующих фазных обмоток показаны на рис. 3.28. Вместе с тем каждый магнитный поток соответствующей обмотки имеет свое пространственное положение. Эти потоки пульсируют с нулевым средним значением. Суммарный магнитный поток внутри статора будет вращаться с постоянной угловой скоростью, пропорциональной частоте сетевого напряжения. Величина модуля суммарного магнитного потока в любой момент времени остается неизменной.

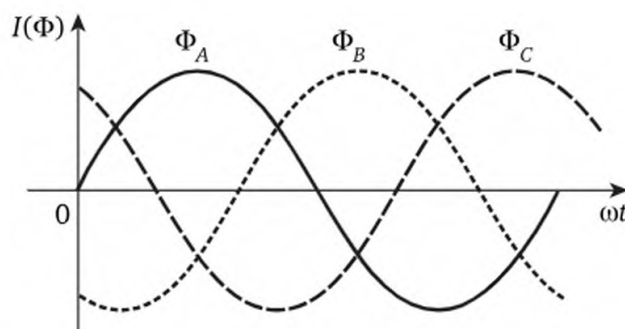


Рис. 3.28. Токи в обмотках статора и пропорциональные им магнитные потоки соответствующих фазных обмоток

Мгновенные значения суммарного вектора магнитного потока в разные моменты относительного времени (ωt) показаны на рис. 3.29. Для упрощения рисунков рассмотрены моменты времени, когда один из фазных токов проходит через ноль. Модуль суммарного потока остается неизменным для любого промежуточного значения момента времени.

Данный рисунок иллюстрирует поворот суммарного вектора магнитного потока внутри статора на половину оборота за половину периода изменения токов в обмотках статора. Таким образом, внутри статора образуется круговое вращающееся поле.

Большое число микромашин делают двухфазными. В этих машинах на статоре располагается две обмотки, сдвинутые друг относительно друга на 90° . В том случае, если переменные токи в этих обмотках будут сдвинуты во времени друг относительно друга на 90° , внутри статора также образуется вращающееся поле. Оно будет круговым при одинаковых амплитудах токов в обмотках.

Направление вращения магнитного поля внутри статора, можно изменить, меняя фазу тока на 180° в одной из обмоток. Если амплитуды токов в фазных обмотках не будут одинаковыми, то вращающееся магнитное поле не будет круговым. Этим свойством пользуются для управления частотой вращения двухфазных исполнительных асинхронных двигателей, меняя амплитуду сигнала управления на одной обмотке статора. При этом амплитуда напряжения на другой обмотке остается постоянной.

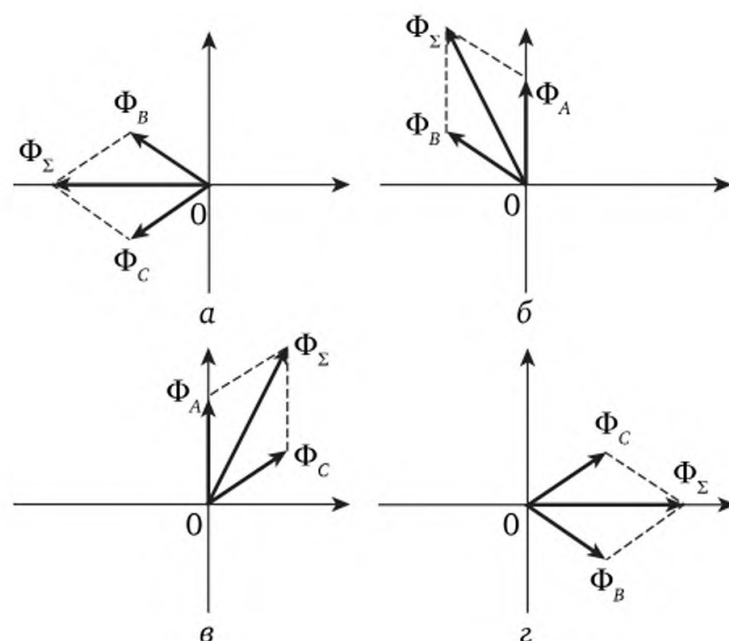


Рис. 3.29. Пространственное положение вектора магнитного потока для разных моментов относительного времени ωt :

$$a — \omega t = 0; б — \omega t = \frac{\pi}{3}; в — \omega t = \frac{2\pi}{3}; г — \omega t = \pi$$

На рис. 3.30 и 3.31 показаны развертки сосредоточенной и распределенной обмоток статора генератора по отношению к полюсам ротора с $p = 2$.

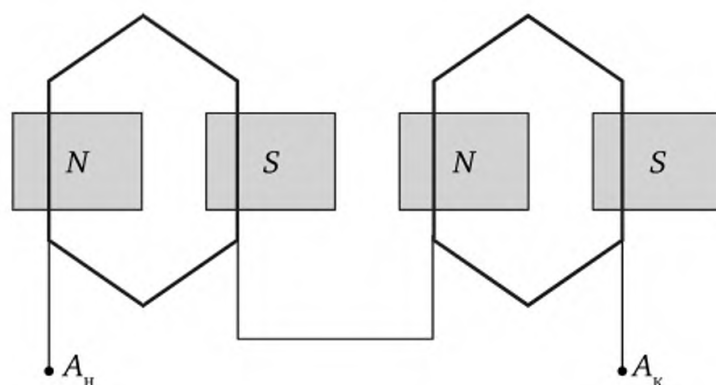


Рис. 3.30. Развертка сосредоточенной однофазной обмотки статора

Недостатком сосредоточенной обмотки является то, что число витков, укладываемых в канал статора, ограничено. Кроме того, форма генерируемой ЭДС содержит дополнительные гармоники, искажающие основную частоту.

Распределенная обмотка свободна от указанных недостатков. В корпусе статора делают множество сверлений и в них, чередуя, укладывают обмотки фаз. При этом число витков обмотки возрастает. Однако такую обмотку сложно реализовать для многополюсных

роторов без увеличения габаритов статора. На рис. 3.31 показана упрощенная развертка распределенной обмотки статора. На практике схема укладки такой обмотки сложнее, что позволяет минимизировать расход меди на каждый двигатель, но при этом сохраняется принцип, показанный на рисунке.

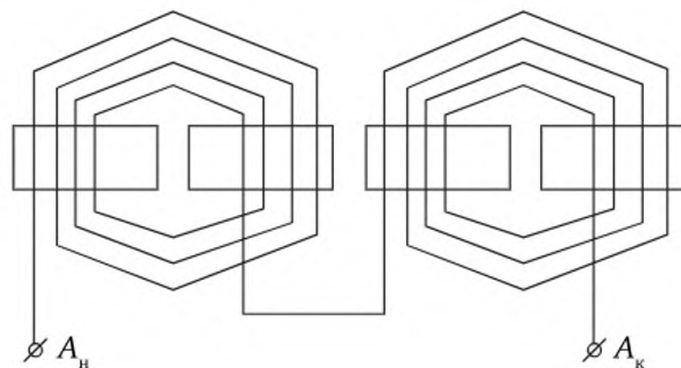


Рис. 3.31. Упрощенная схема распределенной
днофазной обмотки статора

ЭДС одной фазной обмотки синхронного генератора. Пусть длина активной части витка (одной стороны рамки, изображенной на рис. 3.26) составляет l . Окружная скорость $v = \omega \frac{D}{2}$ постоянна. Среднее значение магнитной индукции B по дуге полюсного наконечника также постоянно. Пусть ротор имеет p пар полюсов, и величина полюсного деления составляет $\tau = \frac{\pi D}{2p}$. Тогда среднее значение ЭДС витка с двумя активными сторонами (ЭДС рамки, изображенной на рис. 3.26)

$$e_p = 2lvB = 2l\omega \frac{D}{2} \frac{\Phi}{l\tau} = \omega D \frac{\Phi 2p}{\pi D} = 2 \frac{p}{\pi} \omega \Phi.$$

С учетом, что $\omega = \frac{2\pi f}{p}$, окончательно получаем среднее значение ЭДС витка (рамки):

$$e_p = 4f\Phi.$$

Если генерируемая ЭДС имеет синусоидальную форму за счет специальной конструкции полюсных наконечников и распределенной конструкции обмотки, то среднее значение ЭДС рамки e_p связано с амплитудным значением e_{\max} :

$$e_p = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e_{\max} \sin(\omega t) d\omega t = \frac{2}{\pi} e_{\max} \Rightarrow e_{\max} = \frac{\pi}{2} e_p.$$

Отсюда находится действующее значение:

$$e_{\text{действ}} = \frac{1}{\sqrt{2}} e_{\text{max}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \Phi f = 4,44 \Phi f.$$

Электродвижущая сила обмотки генератора из N витков

$$E_{\text{ген}} = R N e_{\text{действ}} = 4,44 R N \Phi f. \quad (3.15)$$

Коэффициент R учитывает распределенный характер обмотки.

Таким образом, действующее значение ЭДС синхронного генератора пропорционально числу витков фазной обмотки статора, величине потока возбуждения и частоте вращения ротора, выраженной через частоту генерируемого напряжения.

Конструкции роторов. Роторы синхронных машин для создания поля возбуждения выполняются в виде сердечника с обмоткой, запитываемой от источника постоянного тока (возбудителя). Запитка осуществляется через два коллекторных кольца. Роторы делают с явно выраженными и неявно выраженными полюсами. Так же как и в случае роторов машин постоянного тока, в конструкции их сердечника используются пластины тонкой электротехнической стали.

На рис. 3.32 показаны статор 1 с сосредоточенной обмоткой и явнополюсный ротор 2 с $p = 6$ автомобильного синхронного генератора. Следует отметить, что геометрия полюсных наконечников автомобильного синхронного генератора такова, что форма генерируемого напряжения оказывается далекой от синусоидальной. Однако для такого массового генератора это не имеет принципиального значения, так как вырабатываемое трехфазное напряжение в автомобиле далее поступает на трехфазный выпрямитель и стабилизатор, формируя бортовую сеть постоянного тока.



Рис. 3.32. Статор (1) и ротор (2) автомобильного синхронного генератора

Полюсным наконечникам роторов промышленных генераторов придают специальную форму, которая в сочетании с распределен-

ной обмоткой позволяет генерировать ЭДС, близкую по форме к синусоидальной.

Подобные роторы используются в машинах с относительно невысокой частотой вращения и на большое число пар полюсов, например, генераторах на гидроэлектростанциях (ГЭС). При высоких частотах вращения ротора (для предотвращения выпадения обмотки) его конструкцию делают без явно выраженных полюсов. Обмотку укладывают во внутренние сверления по образующим сердечника ротора. Такие роторы имеют одну или две пары полюсов, как, например, генераторы на тепловых электростанциях (ТЭС).

Роторы синхронных микромашин часто выполняют с использованием постоянных магнитов. В таких машинах отсутствует коллекторный узел.

Роторы асинхронных машин бывают трех видов:

- 1) трехфазный (фазный ротор);
- 2) «беличья» клетка;
- 3) полый немагнитный (металлический) стакан.

Основную долю асинхронных машин составляют двигатели. Конструктивно все роторы являются короткозамкнутыми. Фазные роторы используют в машинах большой мощности (свыше 1 кВт); ротор «беличья клетка» применяют в микромашинах средней мощности (до 1 кВт); полый немагнитный стакан — в микромашинах малой мощности (от долей ватта до 15—20 Вт).

Фазный ротор имеет три сдвинутые на 120° друг относительно друга обмотки. Концы обмоток фазного ротора через три коллекторных кольца выводят наружу и подсоединяют к пусковым реостатам, как показано на рис. 3.33.

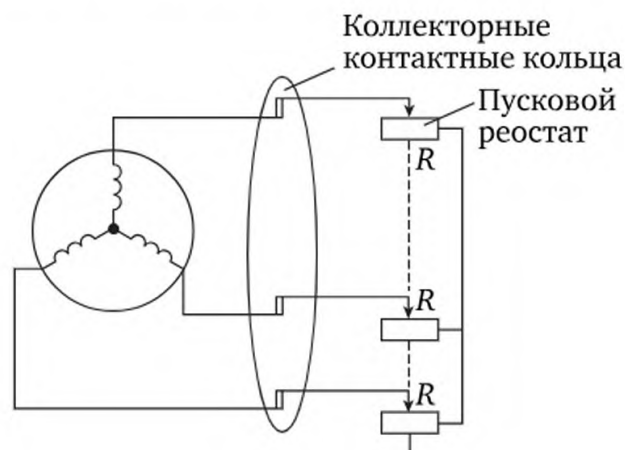


Рис. 3.33. Подключение фазного ротора к пусковым реостатам

В режиме нормальной эксплуатации сопротивление реостатов равно нулю, и ротор становится короткозамкнутым. Роль пусковых реостатов будет рассмотрена в п. 3.2.3.2.

Ротор типа «беличья клетка» представляет собой сердечник из листов электротехнической стали, в продольные пазы которого укладывают стержни обмотки. Концы стержней подсоединены к проводящим шайбам на торцах сердечника. Вся эта конструкция образует короткозамкнутую обмотку. Никаких выводов наружу такая обмотка не имеет.

Процессы, происходящие в обмотке типа «беличья клетка», показаны на рис. 3.34.

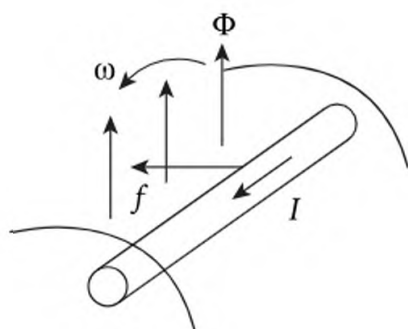


Рис. 3.34. Принцип работы асинхронного двигателя

Для пояснения принципа работы асинхронного двигателя следует последовательно пользоваться сначала правилом правой руки, а потом правилом левой руки. Магнитные силовые линии вращающегося поля пересекают стержень короткозамкнутой обмотки ротора и наводят в нем ЭДС. Появляется ток (обмотка замкнута), который взаимодействует с движущимся полем. Возникает сила, направленная в сторону движения вектора магнитного поля. При этом всегда частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля ($\omega_p < \omega_0$), так как, если $\omega_p = \omega_0$, то не будет пересечения магнитными силовыми линиями стержня обмотки, не будет наводиться ЭДС индукции в стержне, не будет тока в стержне и не будет силы (момента), приводящей во вращение ротор.

Для анализа работы асинхронного двигателя вводится переменная, называемая коэффициентом скольжения s :

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_p}{\omega_0}. \quad (3.16)$$

В режиме пуска $\omega_p = 0$, $s = 1$. В режиме номинального вращения ротора $s = 0,03 \div 0,05$.

На рис. 3.35 показана конструкция асинхронного двигателя с ротором в виде полого немагнитного стакана.

Момент инерции такого ротора очень мал. Этот ротор за счет вихревых токов, образующихся на поверхности стакана при вращении магнитного поля, ведет себя подобно ротору с обмоткой «беличья клетка».

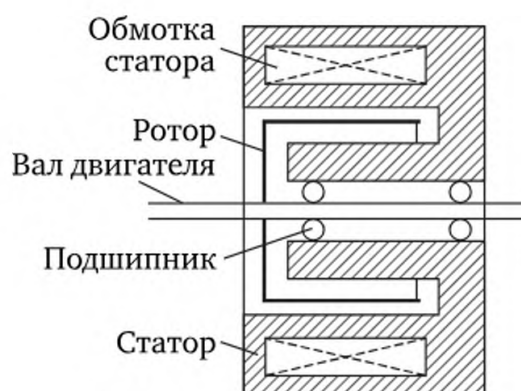


Рис. 3.35. Конструкция двигателя с полым немагнитным ротором

3.2.3.2. Асинхронные двигатели

Статические характеристики асинхронного двигателя можно получить, воспользовавшись энергетической диаграммой, показанной на рис. 3.36. Баланс электрической мощности, которая поступает на двигатель из электрической сети, в соответствии с этой диаграммой представляется системой уравнений (3.17):

$$\begin{aligned} P_{\text{сети}} &= P_{\text{м1}} + P_{\text{ст1}} + P_{\text{эм}}; \\ P_{\text{эм}} &= P_{\text{м2}} + P_{\text{ст2}} + P_{\text{м}}; \\ P_{\text{эм}} &= M_{\text{дв}} \omega_0; \\ P_{\text{м}} &= M_{\text{дв}} \omega_{\delta}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

где $P_{\text{м1}}$, $P_{\text{м2}}$ — тепловые потери на активных сопротивлениях r_1 , r_2 обмоток статора и ротора соответственно; $P_{\text{ст1}}$, $P_{\text{ст2}}$ — потери в стали статора и ротора соответственно; $P_{\text{эм}}$ — электромеханическая мощность ротора; $P_{\text{м}}$ — механическая мощность двигателя.

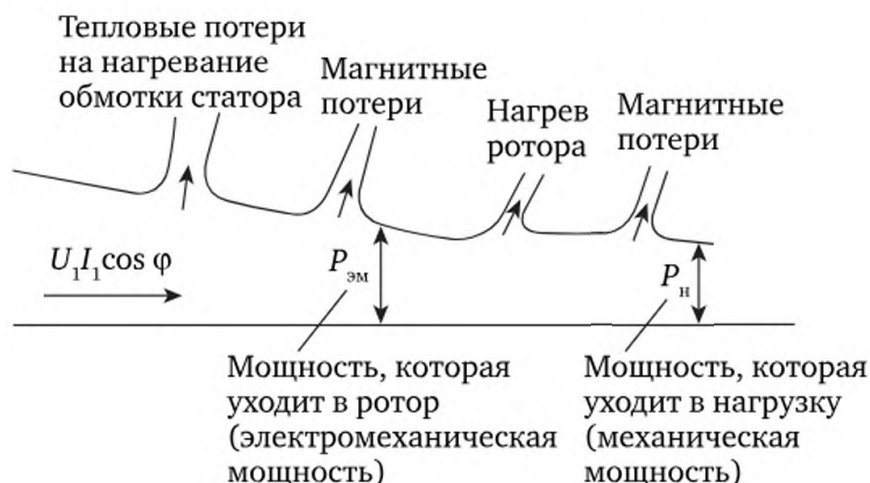


Рис. 3.36. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Электрическая мощность, поступающая на двигатель от сети, $P_{\text{сети}} = m_1 U_1 I_1 \cos \phi$. Коэффициент m_1 пропорционален числу фаз

и типу обмотки статора. Не нарушая общности получаемых далее результатов, будем считать его равным единице. Кроме того, в дальнейших выводах не будем рассматривать потери в стали статора и ротора, так как они обычно гораздо меньше тепловых потерь в обмотках. Тогда, в соответствии с формулой (3.16), механическая характеристика асинхронного двигателя может быть представлена через ток ротора I_2 в виде

$$M_{\text{дв}}(\omega_0 - \omega_\delta) = I_2^2 r_2,$$

или с учетом (3.16)

$$M_{\text{дв}} = \frac{I_2^2 r_2}{\omega_0 s}. \quad (3.18)$$

Далее выражение (3.18) приведем к виду $M_{\text{дв}} = f(U_1, s)$. Для этого следует воспользоваться схемой замещения трансформатора. В самом деле, асинхронный двигатель в режиме пуска ($\omega_p = 0$) может быть представлен трансформатором, у которого первичной обмоткой является обмотка статора, а вторичной — обмотка ротора. Поскольку обмотка ротора короткозамкнутая, то $Z_{\text{н}} = 0$. В соответствии со схемой замещения на рис. 3.7 и соотношением (3.6) ток в обмотке статора определяется как

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (3.19)$$

При вращении ротора ($\omega_p \neq 0$), очевидно, что наводимая в нем ЭДС ($E_{2\text{вр}}$) пропорциональна разностной частоте $\omega_0 - \omega_p$, т. е.

$$E_{2\text{вр}} = E_2 \frac{\omega_0 - \omega_\delta}{\omega_0} = E_2 s.$$

Аналогично меняется и индуктивное сопротивление обмотки ротора $X_{2\text{вр}} = X_2 s$. В данных соотношениях E_2 и X_2 — соответственно ЭДС индукции ротора и индуктивное сопротивление ротора при пуске. В этом случае закон Кирхгофа для короткозамкнутой цепи ротора будет иметь вид

$$E_2 = I_2 \left(\frac{r_2}{s} + X_2 \right). \quad (3.20)$$

С учетом формулы (3.20) соотношение (3.19) принимает вид

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (3.21)$$

Отметим, что получившееся соотношение (3.21) является более общим, так как для пускового режима двигателя ($s = 1$) превращается в формулу (3.19).

Подставив (3.21) в (3.18), получаем соотношение (3.22) для построения механической характеристики асинхронного двигателя:

$$M_{\text{дв}} = \frac{I_2^2 r_2}{\omega_0 s} = \frac{I_1^2 r_2'}{\omega_0 s} = \frac{r_2'}{\omega_0 s} \frac{U_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + X_\Sigma^2}, \quad (3.22)$$

где $X_\Sigma = X_1 + X_2'$.

Механические характеристики, построенные в зависимости от момента, развиваемого двигателем $M_{\text{дв}} = M_{\text{н}}$ на основании выражения (3.22) представлены на рис. 3.37. По оси ординат на левой характеристике откладывается коэффициент скольжения s , а на правой — частота вращения ротора ω_p .

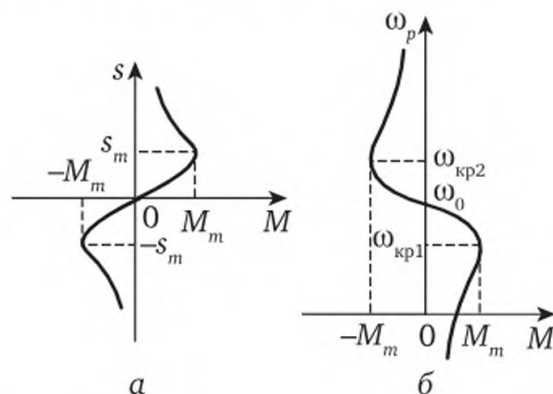


Рис. 3.37. Механические характеристики асинхронного двигателя:

a — для коэффициента скольжения s ; b — для частоты вращения ротора ω_p

Полученные характеристики имеют нелинейный характер. Устойчивое вращение ротора двигателя обеспечивается для характеристики a на участке с положительным наклоном характеристики, а для характеристики b — на участке с отрицательным наклоном. Определим параметры экстремумов M_m , s_m на этих характеристиках, решая уравнение $\frac{\partial M_{\text{дв}}}{\partial s} = 0$:

$$s_m = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + X_\Sigma^2}}; \quad (3.23)$$

$$M_m = \frac{U_1^2}{2\omega_0(r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + X_\Sigma^2})}.$$

Отметим, что согласно формуле (3.23) критическое значение коэффициента скольжения s_m зависит от активного сопротивления ро-

тора r_2 , а максимальный момент, развиваемый двигателем, зависит от U_1 и не зависит от r_2 .

Вернемся к механической характеристике. На ней видно, что для частот вращения $0 < \omega_p < \omega_{кр}$ режим работы двигателя является неустойчивым. В рабочем диапазоне частот $\omega_{кр} \leq \omega_p < \omega_0$ регулирование частоты вращения напряжением является неэффективным (особенно при малых моментах нагрузки). Этот вывод иллюстрируется рис. 3.38, а.

Режим запуска двигателя с фазным ротором при наличии момента нагрузки, превышающего пусковой момент, можно осуществить с использованием пусковых реостатов, показанных на рис. 3.33. Эти реостаты позволяют уменьшить критическую частоту вращения ротора $\omega_{кр}$ вплоть до нулевого значения, а по мере разгона ротора величина сопротивления этих реостатов снижается до нулевого значения. Пусковой режим показан на рис. 3.38, б.

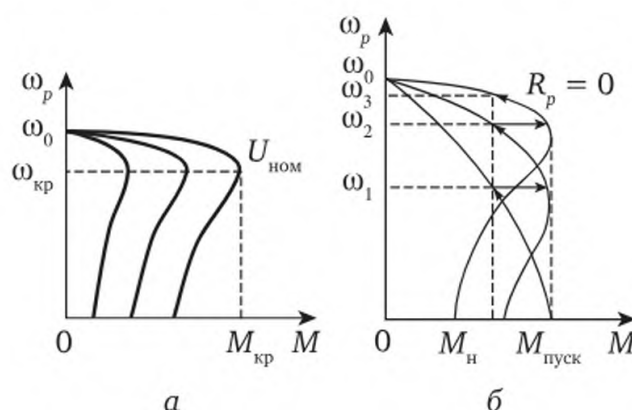


Рис. 3.38. Режим регулирования частоты вращения напряжением (а) и пусковой режим (б)

Очевидно, что для асинхронных двигателей лучшим вариантом управления скоростью является частотное, когда частота вращения магнитного поля статора ω_0 меняется пропорционально управляющему сигналу. Иными словами, для управления необходимо иметь частотный преобразователь, который преобразует частоту питающего напряжения в зависимости от величины управляющего сигнала. Этот вопрос рассматривается в п. 3.3.3.5.

Двухфазные асинхронные исполнительные двигатели применяются в маломощных (приборных) системах управления. На рис. 3.39, а показаны двигатели серии ДИД мощностью 0,5 Вт со встроенными асинхронными тахогенераторами. Достоинством двигателей является то, что можно управлять скоростью вращения ротора в широких пределах, изменяя напряжение в одной из двух обмоток статора. Роторы этих машин — либо беличья клетка, либо полый немагнитный стакан. На статоре две обмотки: обмотка управления (ОУ) и обмотка возбуждения (ОВ), расположенные перпендикуляр-

но друг другу. Как отмечалось выше, если токи, протекающие в обмотках, сдвинуты во времени по отношению друг к другу на 90° , то внутри статора образуется вращающееся поле. Оно круговое, если амплитуды токов в обмотках будут равными, и эллиптическое, если управлять амплитудой токов в ОУ. Если ток в ОУ будет равен 0, то поле будет пульсирующим. Направление вращения поля можно изменить, поменяв фазу напряжения управления на 180° . Амплитудное управление частотой вращения осуществляется по схеме, изображенной на рис. 3.39, б.



Рис. 3.39. Двухфазные асинхронные двигатели серии ДИД (а) и схема подключения (б) двухфазного исполнительного двигателя к однофазной сети и управляющему усилителю мощности (УМ)

Конденсатор C_B обеспечивает сдвиг токов в обмотках во времени на угол, близкий к 90° по отношению друг к другу. На схеме показано, как происходит управление частотой вращения ротора. Изменение (уменьшение) амплитуды напряжения управления от номинальной приводит к искажению вращающегося магнитного поля в статоре. Оно становится эллиптической формы.

Можно показать, что любое эллиптическое поле представляется в виде двух круговых, вращающихся в разные стороны магнитных полей. Например, если амплитуда тока (потока) возбуждения составляет три условные единицы (например, три ампера), а управления — один ампер, то одно круговое поле образуется «запиткой» одинаковыми токами по два ампера обмоток управления и возбуждения, а другое — запиткой токами в один ампер тех же обмоток, но ток в обмотке управления во втором случае должен быть в противофазе по отношению к току управления, участвующему в создании первого поля (т. е. вращение второго поля идет в другую сторону). Эти рассуждения применительно к потокам иллюстрируются рис. 3.40.

Для получения механической характеристики такого двигателя строят на одном графике две механические характеристики для двух двигателей с получившимися круговыми полями. При этом одна характеристика строится для положительных значений частот вращения, а другая — для отрицательных. Эти характеристики от-

личаются друг от друга знаками и значениями модулей максимальных моментов. Характеристика двигателя при данной величине напряжения управления получается геометрическим сложением исходных характеристик для двигателей с круговыми, вращающимися в разные стороны полями.

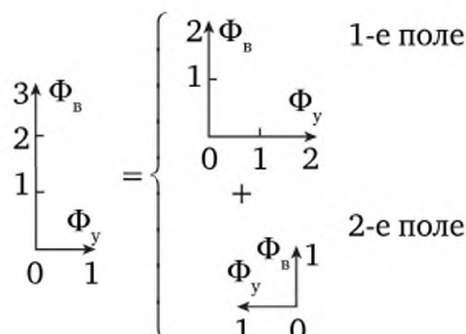


Рис. 3.40. Пример представления эллиптического магнитного поля в виде суммы двух круговых, вращающихся в разные стороны полей

Заметим, что внутреннее активное сопротивление роторов двухфазных асинхронных двигателей делают такими, чтобы критические значения частот вращения были близки к нулю. Построенная таким образом механическая характеристика показана на рис. 3.41 сплошной линией, а вращающиеся в разные стороны круговые поля приводят к механическим характеристикам, показанным пунктирными линиями.

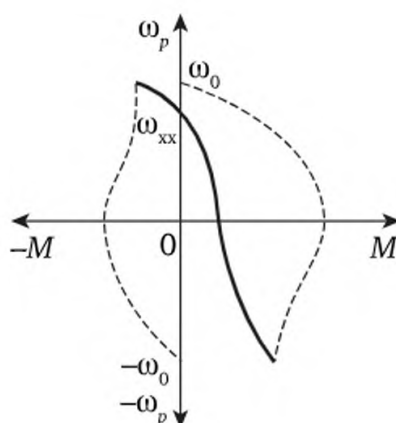


Рис. 3.41. Построение механической характеристики двухфазного асинхронного двигателя при амплитудном управлении

Отметим, что скорость холостого хода при уменьшении напряжения управления уменьшается. Если напряжение управления равно нулю, получается пульсирующее поле, которое представляется в виде суммы двух одинаковых круговых и вращающихся в разные стороны полей. В этом случае результирующая механическая характеристика очевидно должна проходить через начало координат.

Семейство механических характеристик двухфазного асинхронного двигателя при амплитудном управлении показано на рис. 3.42.

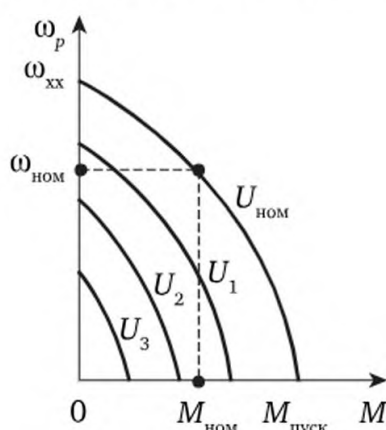


Рис. 3.42. Семейство механических характеристик двухфазного асинхронного двигателя при амплитудном управлении

Передаточную функцию и структурную схему двухфазного асинхронного исполнительного двигателя получают путем линеаризации механической характеристики для номинального значения напряжения управления. Такая характеристика показана на рис. 3.43, причем для удобства на ней произведена замена местами осей абсцисс и ординат. Для получения передаточной функции двигателя его механическую характеристику подвергают линеаризации в рабочем диапазоне частот вращения $0 \leq \omega_p \leq \alpha \omega_{\text{ном}}$. Обычно $\alpha = 1,1 \div 1,2$. Этот диапазон наиболее характерен для позиционных (следающих) систем управления и закладывается при проектировании будущей системы.

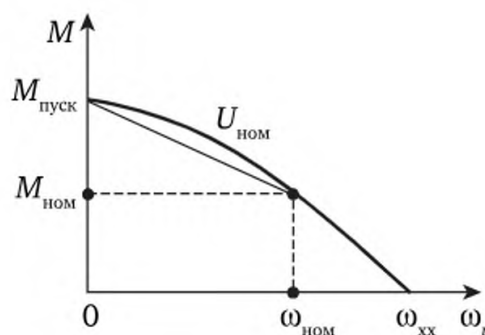


Рис. 3.43. Линеаризация механической характеристики

Запишем два уравнения динамики двигателя для линеаризованного варианта механической характеристики:

$$\begin{cases} M_{\text{дв}} = bU_{\text{упр}} - a\omega; \\ M_{\text{дв}} = J \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{н}}. \end{cases} \quad (3.24)$$

Приравнявая правые части (3.24) друг другу и переходя к преобразованию Лапласа, получаем:

$$(T_{\text{дв}}p + 1)\omega(p) = K_{\text{дв}}U_{\text{упр}}(p) - K_{\text{м}}M_{\text{н}}(p),$$

где $T_{\text{дв}} = \frac{J}{a}$ — постоянная времени двигателя; $K_{\text{дв}} = \frac{b}{a}$ — коэффициент передачи двигателя по управлению; $K_{\text{м}} = \frac{1}{a}$ — коэффициент передачи двигателя по моменту.

Коэффициенты линеаризации a и b могут быть определены по точкам пускового и номинального режимов:

$$b = \frac{M_{\text{пуск}}}{U_{\phi.\text{ном}}}; a = \frac{M_{\text{пуск}} - M_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}};$$

$$\omega(p) = \frac{K_{\text{дв}}U_{\text{упр}}(p) - K_{\text{м}}M_{\text{н}}(p)}{T_{\text{дв}}(p) + 1}. \quad (3.25)$$

Динамика асинхронного двухфазного двигателя, описываемого формулами (3.25), совпадает с уравнением динамики двигателя постоянного тока (3.11), за исключением того, что в этом двигателе не учитывается момент потерь M_{σ} . Структурная схема двигателя совпадает со схемой, изображенной на рис. 3.18.

3.2.3.3. Принципы управления асинхронными двигателями

Управление двухфазными асинхронными исполнительными двигателями не вызывает принципиальных трудностей, так как может осуществляться обычным усилителем переменного тока. Этот усилитель должен управлять амплитудой напряжения фиксированной частоты и вносить минимальные фазовые искажения. Обычно для этой цели хорошо подходят двухтактные усилители с трансформаторным выходным каскадом. Принципиальная схема такого усилителя показана на рис. 3.44.

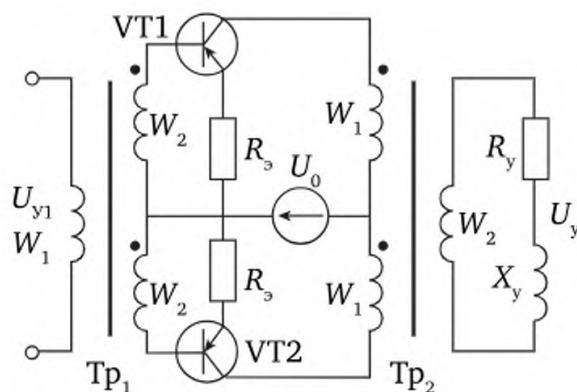


Рис. 3.44. Принципиальная схема двухтактного усилителя

В этой схеме входной сигнал, поступающий на трансформатор Tr_1 , разделяется двумя выходными обмотками этого трансформатора на две составляющие, которые по очереди открывают и закрывают силовые транзисторы VT1 и VT2. Каждый из этих транзисторов пропускает половину периода несущей частоты. Усиленный сигнал снимается с выходной обмотки второго трансформатора и поступает на обмотку управления двигателя.

Далее будет рассмотрен пример расчета такого усилителя. Упомянутый в п. 3.2.2.5 магнитный усилитель также может быть использован для целей управления двухфазным асинхронным двигателем, поскольку существуют его разновидности в виде усилителя как постоянного, так и переменного тока. Принцип построения и работы магнитного усилителя поясним на примере простейшего усилителя, изображенного на рис. 3.45.

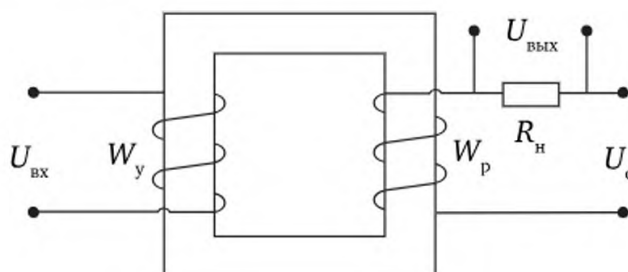


Рис. 3.45. Принцип построения простейшего магнитного усилителя

Простейший магнитный усилитель, или дроссель насыщения, представляет собой замкнутый ферромагнитный сердечник с двумя обмотками: рабочей обмоткой W_p и обмоткой управления W_y . Рабочая обмотка запитывается от источника переменного напряжения U_c , например от промышленной сети.

Входной сигнал $U_{вх}$, или сигнал управления — это сигнал от источника постоянного напряжения одной полярности, величина которого может меняться. Выходной сигнал $U_{вых}$ снимается в виде переменного напряжения с нагрузочного резистора R_n . В отсутствие сигнала управления ток в рабочей обмотке оценивается соотношением

$$I = \frac{U_c}{\sqrt{R_n^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Поскольку для магнитного усилителя обычно при вводимом сопротивлении нагрузки стремятся выполнить условие $R_n \ll \omega L$, то в этом случае

$$I \approx \frac{U_c}{\omega L} \Rightarrow L = \frac{U_c}{\omega I}.$$

Воспользовавшись формулой (3.15) при известном числе витков рабочей обмотки w , получаем соотношение, связывающее величину индуктивности рабочей обмотки L с магнитной проницаемостью сердечника μ :

$$L = \frac{4,44wf\Phi}{\omega \frac{Hl}{w}} = \frac{4,44w^2sB}{lH} = \frac{4,44w^2s}{l} \mu. \quad (3.26)$$

Магнитная проницаемость сердечника, определяемая петлей гистерезиса, максимальна в окрестности начала координат (см. рис. 1.6, б). Именно в начале координат в этом случае находится рабочая точка магнитного усилителя в отсутствие сигнала в обмотке управления. В самом деле, в сердечнике будет пульсирующий магнитный поток, вызванный переменной МДС. Появление постоянного тока в обмотке управления приводит к смещению рабочей точки по кривой намагничивания магнитного усилителя в сторону увеличения напряженности H . При этом величина магнитной проницаемости уменьшается, что приводит к росту тока в рабочей обмотке и, соответственно, к росту выходного напряжения усилителя. Можно сказать, что подмагничивание постоянным током приводит к уменьшению магнитной проницаемости и, как следствие, к увеличению (усилению) переменного тока в рабочей обмотке и выходного напряжения усилителя.

Рассмотренный магнитный усилитель обладает множеством очевидных недостатков. Однако на его базе разработаны реверсивные и нереверсивные магнитные усилители, лишенные недостатков простейшего усилителя. Выходным сигналом магнитных усилителей может быть как переменный, так и постоянный ток. Недостатком магнитных усилителей является их значительная инерционность.

Для управления частотой вращения асинхронных трехфазных двигателей широкое распространение получили частотные преобразователи (частотные инверторы). Они преобразуют трехфазную промышленную сеть фиксированной частоты в трехфазную сеть, частота которой меняется в зависимости от управляющего сигнала. Таким образом, осуществляется управление частотой вращения кругового магнитного поля внутри статора и соответственно частотой вращения ротора двигателя.

Существует два вида частотных преобразователей (частотных инверторов):

- 1) с непосредственным преобразованием;
- 2) с промежуточным преобразованием.

Практическое применение нашли преобразователи второго вида. В них сетевое трехфазное напряжение сначала преобразуется трехфазным выпрямителем (по схеме Ларионова) в постоянное, а затем постоянное напряжение в частотном преобразователе пре-

образуется в трехфазное переменное с частотой, пропорциональной управляющему сигналу, как показано на функциональной схеме рис. 3.46.

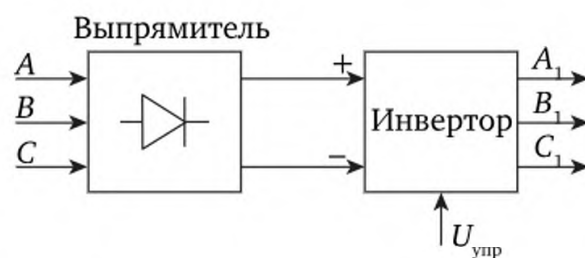


Рис. 3.46. Функциональная схема частотного инвертора

Рассмотрим далее каждое из названных выше устройств.

Трехфазный выпрямитель по схеме Ларионова и формы напряжений на входе и выходе выпрямителя показаны на рис. 3.47. В любой момент времени в схеме открыты одновременно три диода: один сверху и два снизу или наоборот, в зависимости от значений напряжений в фазах сети. Открытые диоды своими более высокими потенциалами блокируют открытие других диодов. Дальнейшее изменение напряжений в фазах приводит к перераспределению открытых и закрытых диодов в схеме.

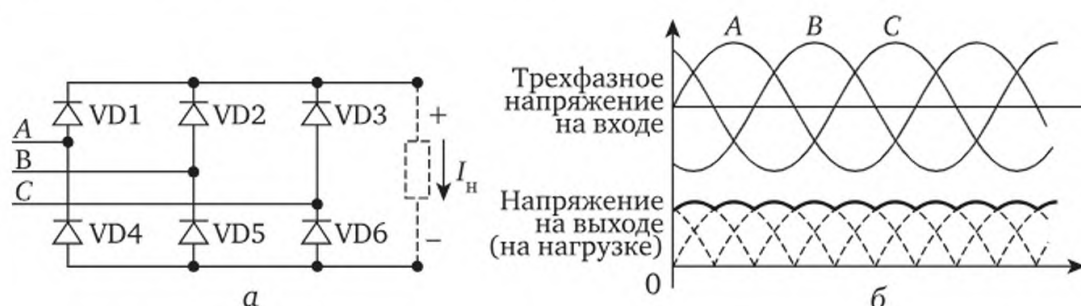


Рис. 3.47. Схема трехфазного выпрямителя и формы напряжений на входе и выходе

Инвертор. Принципиальная схема инвертора приведена на рис. 3.48. Фактически она является словно зеркальным отражением трехфазного выпрямителя по схеме Ларионова, но вместо диодов в ней стоят управляемые транзисторы. Силовые транзисторы (IGBT) работают в ключевом режиме. Шунтирующие диоды в составе транзисторов защищают их от пробоя при закрытии.

Рассмотрим идеализированный вариант (без учета токов через обратные диоды при закрытии транзисторов) изменения токов в обмотках статора в разные моменты времени. Условимся считать, что если ток в фазной обмотке статора идет к общей точке, то он имеет положительное значение, а если наоборот, то отрицательное. Если в двух фазах идут одновременно токи одного знака, то их величина в два раза меньше, чем весь ток через один транзистор. Равно-

мерное вращение магнитного поля внутри статора получается, если токи в трехфазной обмотке статора сделать сдвинутыми относительно друг друга на 120° .

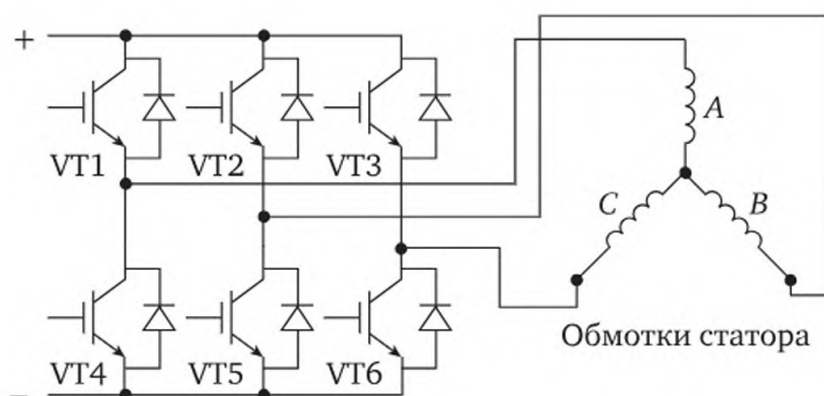


Рис. 3.48. Принципиальная схема инвертора

Изучим изменения токов в фазных обмотках при включении и выключении транзисторов согласно табл. 3.2 через равные промежутки времени Δt . В табл. 3.2. приняты следующие обозначения: «1» — открытое состояние транзистора, «0» — закрытое состояние транзистора.

Таблица 3.2

Последовательность переключения транзисторов при вращении магнитного поля в одну сторону

Интервал времени	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6
t_0-t_1	1	0	0	0	1	1
t_1-t_2	1	1	0	0	0	1
t_2-t_3	0	1	0	1	0	1
t_3-t_4	0	1	1	1	0	0
t_4-t_5	0	0	1	1	1	1
t_5-t_6	1	0	1	0	1	0
t_6-t_7	1	0	0	0	1	1

Токи в фазных обмотках статора, определяемые токами через открытые транзисторы без учета токов через обратные диоды при закрытии транзисторов, показаны на рис. 3.49. Эти токи сдвинуты во времени друг относительно друга на 120° . Период изменения токов составляет $6\Delta t$. Это несложно заметить, если аппроксимировать данные токи, как показано для тока в фазе A. Шунтирующие диоды при открывании транзисторов закрыты, но при закрывании транзистора накопленная в индуктивности обмотки энергия рассеивается в виде обратного тока через эти диоды.

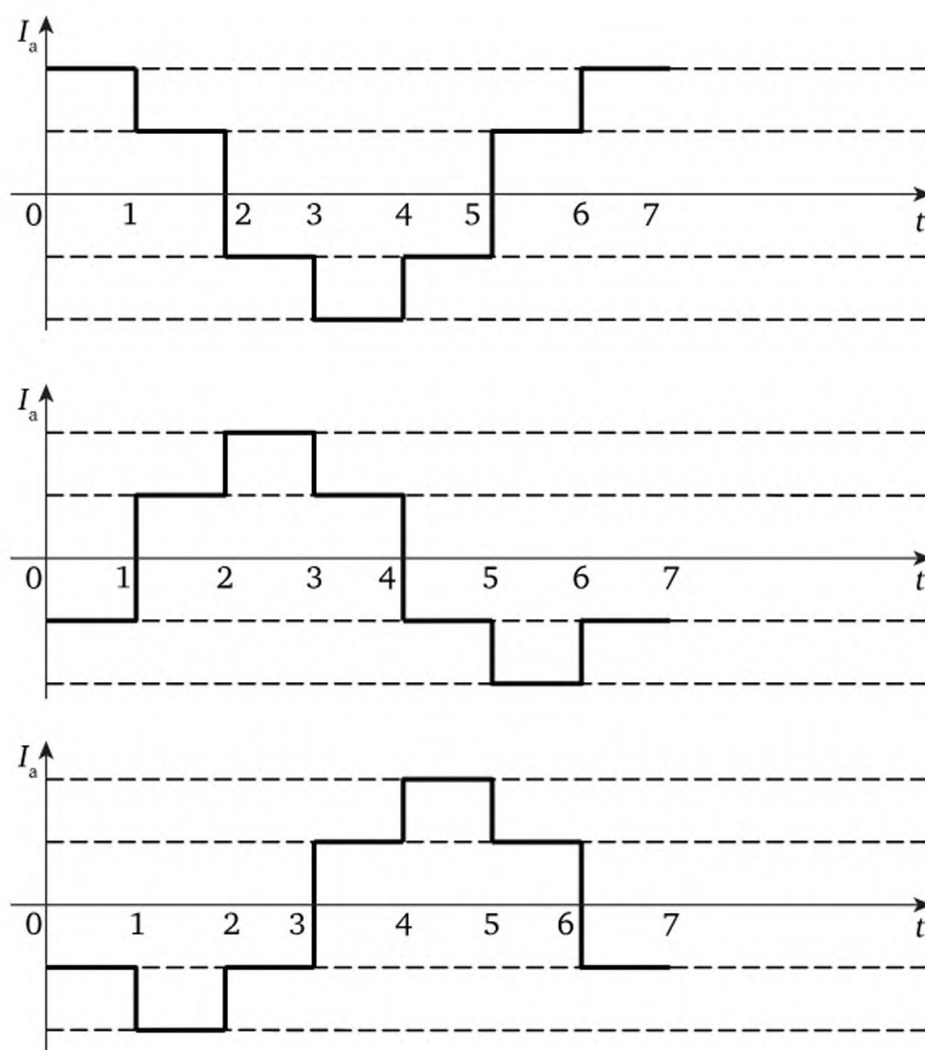


Рис. 3.49. Токи в фазных обмотках статора (без учета токов через обратные диоды)

Учет токов через обратные диоды (через которые рассасывается энергия, запасенная в индуктивностях коммутируемых обмоток статора), приведет к сглаживанию кривых, показанных на рис. 3.49. Таким образом, токи в фазных обмотках на самом деле не меняются скачком, а имеют плавное изменение из-за индуктивного характера нагрузки.

Для вращения поля в обратную сторону необходимо реализовывать логику переключения по табл. 3.2 снизу вверх.

Управление частотой осуществляется за счет регулировки величины Δt . Чем больше шаг дискретизации Δt , тем ниже частота вращения поля внутри статора и ниже частота вращения ротора двигателя.

3.2.3.4. Генераторы переменного тока

Как отмечалось выше (см. формулу (3.15)), ЭДС обмотки синхронного генератора на холостом ходу (без внешней нагрузки) определяется выражением

$$E_{\text{ген}} = 4,44RNf\Phi = 4,44RN \frac{p}{2\pi} \omega\Phi. \quad (3.27)$$

При постоянстве потока возбуждения Φ_0 генерируемая ЭДС пропорциональна частоте вращения ротора генератора ω . Однако на ЭДС синхронного генератора большое влияние оказывают величина и вид нагрузки (активная, индуктивная, емкостная, смешанная (активно-индуктивная)). В зависимости от вида нагрузки может ослабляться или усиливаться поток возбуждения Φ_0 , что приводит к изменению величины ЭДС, а также влияет на величину напряжения на зажимах генератора U_r .

Рассмотрим влияние характера нагрузки на изменение потока возбуждения генератора. На рис. 3.50 показано влияние характера нагрузки на поток возбуждения Φ_0 . На рисунке условно изображен вращающийся против часовой стрелки ротор генератора и соответственно вращающийся с ним поток возбуждения Φ_0 . При чисто активной нагрузке, вариант а, наводимая ЭДС E и ток I в обмотке статора, определяемый нагрузкой, будут синфазными. На рисунке их векторы параллельны. Ток нагрузки при этом создает поток реакции Φ_2 , который оказывается перпендикулярным по отношению к потоку возбуждения Φ_0 , поэтому не искажает его. При чисто индуктивной нагрузке (б) максимум тока в нагрузке отстает от максимума наводимой ЭДС на 90° и вследствие этого поток реакции, создаваемый током нагрузки, оказывается в противофазе к потоку возбуждения. В таком случае происходит ослабление потока возбуждения. Это явление называют размагничивающим эффектом нагрузки.

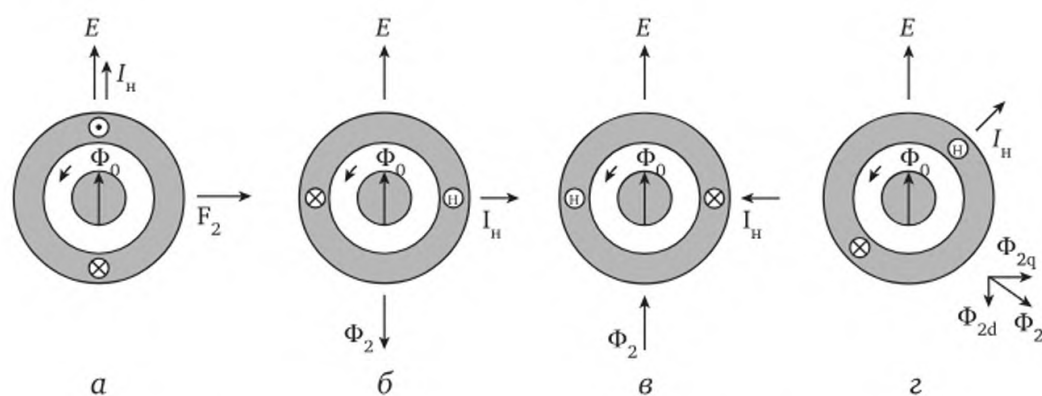


Рис. 3.50. Влияние характера нагрузки на поток возбуждения:

а — активная; б — индуктивная; в — емкостная; г — активно-индуктивная

Для чисто емкостной нагрузки, отображенной на варианте в, имеет место эффект дополнительного подмагничивания или усиление потока возбуждения. Наиболее распространен на практике вариант (г) активно-индуктивной нагрузки, когда максимум тока отстает от максимума наводимой ЭДС на некоторый промежуточный угол, меньший 90° . В этом случае поток реакции Φ_2 может быть разложен на две составляющие: поперечную составляющую Φ_{2q} ,

которая не искажает поток возбуждения, и продольную составляющую Φ_{2d} , которая приводит к ослаблению основного потока возбуждения Φ_0 .

Векторные диаграммы синхронного генератора при разных типах нагрузки. Помимо влияния на поток возбуждения генератора реакция нагрузки также влияет на величину и взаимное расположение векторов ЭДС и напряжения на зажимах генератора $\dot{U}_Г$. На рис. 3.51 показана схема замещения нагруженного генератора с учетом активного $r_я$ и реактивного $X_я$ сопротивлений обмотки статора (якоря).

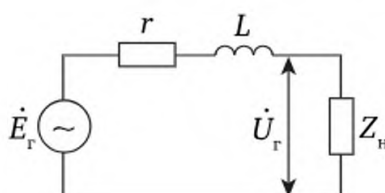


Рис. 3.51. Схема замещения нагруженного генератора

Рассмотрим векторные диаграммы генератора при разных типах нагрузки. Напряжение на зажимах генератора определяется как

$$\dot{U}_Г = \dot{E}_{ген} - \dot{I}_я r_я - \dot{I}_я X_я.$$

В соответствии с данным уравнением строятся векторные диаграммы синхронного генератора для разных видов нагрузок, показанные на рис. 3.52. При построении диаграмм считаем, что задаваемое исходное положение и величина вектора ЭДС уже учитывают влияние реакции нагрузки на поток возбуждения.

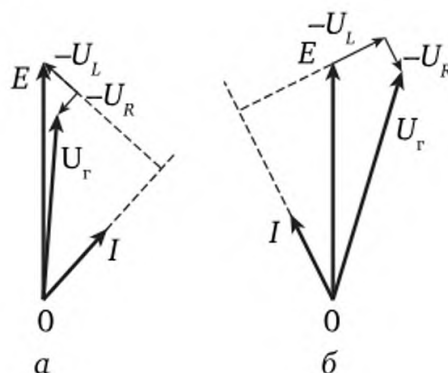


Рис. 3.52. Векторные диаграммы синхронного генератора:

а — активно-индуктивная нагрузка; б — активно-емкостная нагрузка

При активно-индуктивной нагрузке ток отстает от ЭДС. С учетом падения напряжения на обмотке получаем отставание вектора выходного напряжения на зажимах генератора и уменьшение его по модулю по отношению к вектору ЭДС.

При активно-емкостной нагрузке вектор тока опережает вектор ЭДС. С учетом падения напряжения на обмотке снова получаем отставание вектора напряжения на зажимах генератора от вектора ЭДС. Однако в этом случае модуль вектора напряжения на зажимах генератора может превысить величину модуля вектора ЭДС.

Синхронные тахогенераторы могут использоваться в качестве датчиков частоты вращения ротора в соответствии с формулой (3.27). Однако такие тахогенераторы на практике используются в системах автоматики редко. Объясняется это нелинейным характером их статических характеристик. Даже при высокоомной активной нагрузке такого тахогенератора искажение статической характеристики определяется зависимостью индуктивного сопротивления обмотки статора от частоты вращения ротора.

3.2.3.5. Асинхронные тахогенераторы

В автоматических системах широкое распространение получили асинхронные тахогенераторы. На рис. 3.53 представлены схемы асинхронного тахогенератора, поясняющие принцип его работы.

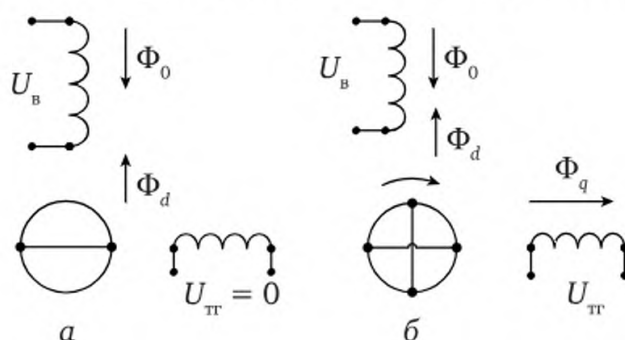


Рис. 3.53. Схема и принцип работы асинхронного тахогенератора:

а — вариант неподвижного ротора тахогенератора;

б — ротор тахогенератора вращается

Асинхронный тахогенератор имеет на статоре две взаимно перпендикулярные обмотки. Одна обмотка возбуждения (на рисунке расположена вертикально) запитывается от сети переменного тока. Вторая обмотка сигнальная (на рисунке расположена горизонтально). Ротор тахогенератора короткозамкнутый, чаще это полый немагнитный стакан либо «беличья клетка». На рисунке ротор показан в виде беличьей клетки, на которой точками условно показаны торцы активных проводников обмотки. Обмотка возбуждения задает пульсирующий магнитный поток возбуждения Φ_0 . При вращении ротора формируются две замкнутые обмотки на роторе, показанные на рис. 3.53, б. Одна из них горизонтальная, в которой, как в трансформаторе, наводится ЭДС и протекает переменный ток, создающий размагничивающий вертикальный поток реакции Φ_d . Этот поток существует всегда, независимо от того, вращается ротор

или нет. Вторая обмотка вертикальная, в которой наводится ЭДС вращения при пересечении активными частями обмотки ротора вертикального потока возбуждения. В этой вертикальной обмотке наводится переменная ЭДС, имеется ток и возникает переменный магнитный поток реакции ϑ_q с частотой напряжения возбуждения и амплитудой, пропорциональной частоте вращения ротора. Данный поток перпендикулярен потоку возбуждения и наводит в сигнальной обмотке переменную ЭДС с частотой питающего напряжения и амплитудой, пропорциональной частоте вращения ротора. Статические характеристики подобного тахогенератора имеют незначительные нелинейные искажения при высокоомной активной нагрузке сигнальной обмотки. Асинхронные тахогенераторы обладают высокой чувствительностью, малым весом, габаритами и инерционностью.

3.2.3.6. Синхронные двигатели. Шаговые и бесконтактные двигатели постоянного тока

Синхронные двигатели. По конструкции синхронный двигатель аналогичен конструкции синхронного генератора. Если подвести к статору переменное трехфазное напряжение, то, так же как и у асинхронного двигателя, внутри статора образуется круговое вращающееся магнитное поле с частотой вращения $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$. Однофазная обмотка ротора, как и в синхронном генераторе, питается постоянным током. Скорость вращения ротора, который является постоянным магнитом, совпадает со скоростью вращения магнитного поля. Именно поэтому такой двигатель называется синхронным. Однако для синхронного вращения ротор надо предварительно разогнать до скорости, близкой к синхронной. Для этого применяют так называемый асинхронный пуск. Реализуется он с помощью вспомогательной короткозамкнутой обмотки типа «беличья клетка», встроенной в полюса ротора.

При запуске однофазную обмотку ротора отключают от источника постоянного тока. Ротор при запуске разгоняется, как асинхронный, до скорости, несколько меньшей частоты вращения магнитного поля ω_0 , и далее при подключении однофазной обмотки ротора к источнику постоянного тока втягивается в синхронизм. Ротор догоняет магнитное поле. При этом в «беличьей клетке» ток будет отсутствовать. «Беличья клетка» нужна только для разгона. Момент подключения однофазной обмотки ротора при асинхронном запуске должен обеспечивать втягивание ротора в синхронизм без толчков и ударов, поэтому является ответственной операцией.

В силу указанных проблем с запуском синхронных двигателей для систем автоматики были разработаны разные типы исполнительных двигателей, в основу которых заложена конструкция син-

хронного двигателя и в которых различными способами решается задача разгона двигателя. К таким двигателям относятся: реактивные двигатели с распределенной обмоткой статора, гистерезисные двигатели, синхронные двигатели с катящимся ротором, редукторные двигатели.

Мощности исполнительных двигателей относительно невелики (до нескольких десятков ватт). Обычно это двигатели с трехфазной распределенной обмоткой на статоре, подключаемые к однофазной сети. Для реализации кругового вращающегося поля внутри статора используется дополнительный, специально подбираемый конденсатор. Сетевое напряжение подводится к двум выводам обмотки. Конденсатор соединяет третий вывод обмотки и один из проводов сети. Соединение обмоток внутри статора может быть как звездой, так и треугольником.

Улучшение пусковых свойств этих двигателей обеспечивается за счет дополнительной реактивной мощности и соответственно дополнительного вращающего момента, зависящего от величины сетевого напряжения и специальных конструктивных особенностей обмотки статора. В гистерезисном двигателе помимо реактивной распределенной обмотки статора дополнительный вращающий момент создается за счет эффекта перемагничивания ротора, выполненного из специального магнитного материала с прямоугольной петлей гистерезиса.

Редукторные двигатели и двигатели с катящимся ротором обеспечивают существенное понижение скорости вращения ротора без использования механического понижающего редуктора. В первом случае понижение скорости обеспечивается за счет разного числа полюсов ротора и статора. Число полюсов на роторе меньше числа полюсов на статоре. При этом, чем больше общее число полюсов и меньше разность числа полюсов на статоре и роторе, тем больше коэффициент редукции. Двигатель с катящимся ротором конструктивно совмещает в себе синхронный двигатель и эффект планетарного редуктора.

Шаговые двигатели (ШД) в соответствии с приведенной ранее классификацией следует отнести к синхронным двигателям в силу того, что ротор такого двигателя отслеживает поворот вектора магнитного поля внутри статора, осуществляемого за счет коммутации его обмоток, подключаемых к источнику постоянного тока. Фактически эти двигатели преобразуют электрические импульсы напряжения управления в дискретные (скачкообразные) угловые повороты ротора с возможной его фиксацией в нужных положениях.

В зависимости от конструкции ротора существует два вида ШД — нереверсивные и реверсивные. В автоматических системах в основном используются реверсивные двигатели. Нереверсивные двигатели нашли широкое распространение в часовых механизмах.

Кроме того, шаговые двигатели могут быть либо с активным явнополюсным ротором с числом пар полюсов в виде постоянных магнитов $p = 1 \div 4$, либо с реактивным ротором, выполненным в виде сердечника из магнитомягкого материала. Поверхность такого сердечника представляет собой чередующиеся выступы и впадины, своего рода гребенку. Шаговые двигатели с активным ротором относят к типу магнитоэлектрических, а ШД с реактивным ротором — индукционного типа.

Статоры ШД выполняют также явнополюсными. Для ШД с активным ротором число полюсов ротора и статора совпадает. Это условие не является обязательным для ШД с реактивным ротором. Число независимых управляющих обмоток по периметру статора обычно четыре (четырёхтактное управление). Реже встречается шесть управляющих обмоток на статоре (шеститактное управление).

На рис. 3.54 представлены конструкции статоров и роторов ШД обоих типов. Вариант 1 — это ШД с реактивным ротором, а вариант 2 — с активным ротором $p = 4$.



Рис. 3.54. Конструкции шаговых двигателей:

1 — ШД с активным ротором; 2 — ШД с реактивным ротором

Рассмотрим логику управления шаговым двигателем на примере ШД с активным ротором ($p = 1$) и с четырьмя обмотками управления, со взаимным расположением друг относительно друга на статоре под 90° . Схема подобного двигателя приведена на рис. 3.55. Пусть в исходном положении ротор в виде постоянного магнита расположен вертикально. При подключении второй обмотки к источнику постоянного напряжения (все остальные обмотки обесточены) ротор повернется на 90° . Далее отключается вторая обмотка, подключается третья и ротор повернется еще на 90° и т. д. Величина шага в этом случае составляет 90° .

Логика подключения обмоток просматривается на графиках изменения токов в обмотках, показанных на рис. 3.56, а. На практике для увеличения момента, развиваемого двигателем, логики управления реализуют таким образом, чтобы всегда включались две соседние обмотки. Например, на первом шаге включены об-

мотки 1 и 2, на следующем шаге — обмотки 2 и 3, далее — обмотки 3 и 4 и т. д. При этом ротор будет занимать последовательно следующие угловые положения: 45° , 135° , 225° и т. д. Подобная логика показана на рис. 3.56, б.

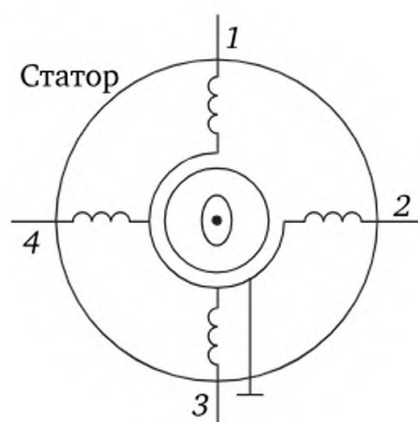


Рис. 3.55. Схема шагового двигателя с $p = 1$

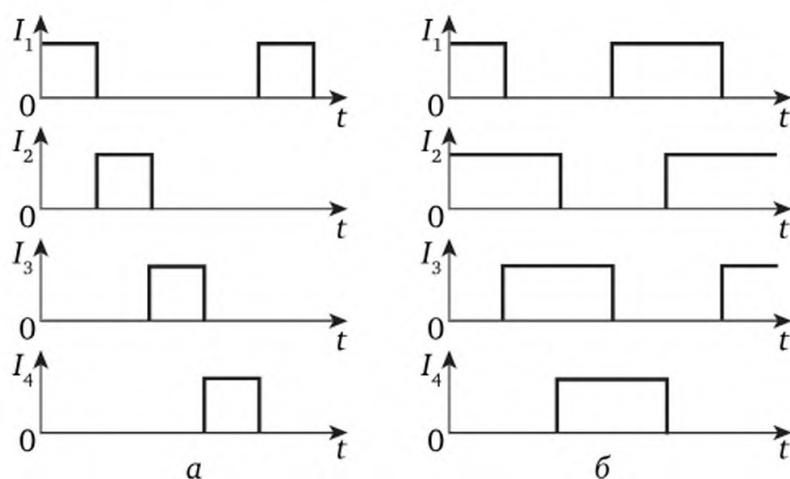


Рис. 3.56. Логика подключения обмоток ШД при вращении ротора в одну сторону:
а — упрощенный вариант; б — вариант увеличения момента, развиваемого двигателем

Реверсирование направления вращения ротора ШД осуществляется изменением последовательности подключения обмоток статора. Величину шага можно уменьшить (электрическое дробление шага) в два раза ($\Delta\varphi = 45^\circ$) за счет усложнения логики коммутации обмоток. Смысл этой логики показан на графиках рис. 3.57. Здесь идет чередование подключения одной обмотки (пусть первой), потом подключение дополнительно соседней (пусть второй), потом отключение первой и т. д. Недостатком такого способа уменьшения шага является переменный момент, развиваемый двигателем.

При четырех обмотках статора, одном магните на роторе ($p = 1$) и электрическом дроблении шаг меньше 45° сделать нель-

зя. Для уменьшения шага нужно увеличивать количество магнитов на роторе. Если их будет четыре ($p = 4$), то минимальный шаг составит $22,5^\circ$. Электрическое дробление позволит уменьшить его еще в 2 раза. Дальнейшее уменьшение шага ШД с активным ротором трудно осуществить по конструктивным соображениям. При этом нужно учитывать, что четыре независимые обмотки управления, чередуясь по окружности статора, будут распределены по 16 полюсам.

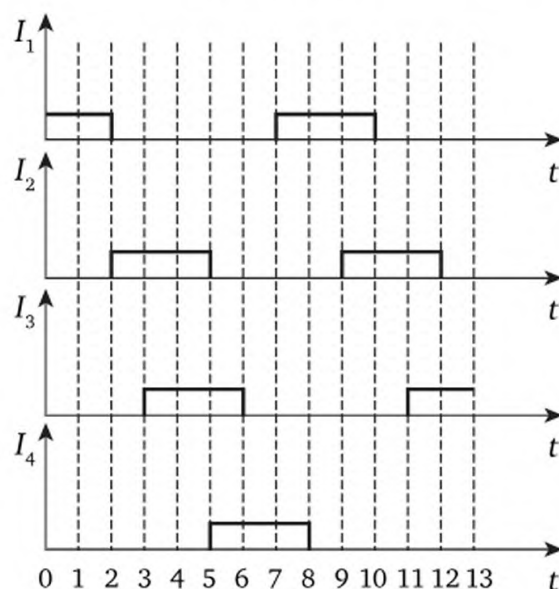


Рис. 3.57. Логика подключения обмоток ШД при электрическом дроблении шага

Значительно меньший шаг может быть получен у двигателей с реактивным ротором. Этот принцип заложен в гребенчатой конструкции ротора и поверхностей полюсов статора ШД. Принцип работы такого ШД показан на рис. 3.58. Здесь представлено взаимное расположение развертки статора вместе с полюсами и развертки ротора.

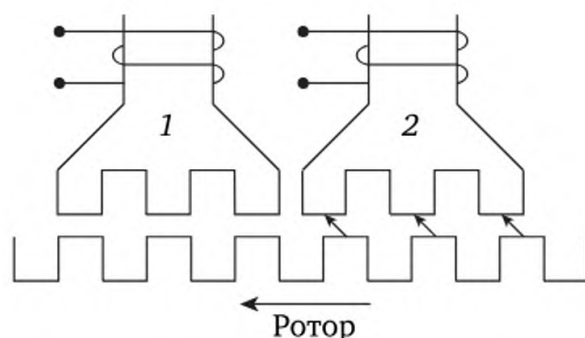


Рис. 3.58. Принцип работы ШД с реактивным ротором

При запитке обмотки полюса 1 зубцы ротора и первого полюса располагаются друг против друга. При этом длина магнитных силовых линии в зазоре будет минимальной, соответствующей мини-

мальному магнитному сопротивлению. Зубцы ротора и второго полюса в этом случае сдвинуты друг относительно друга на половину одного зубца, как показано на рисунке. При подключении второго полюса к источнику и отключении первого магнитные силовые линии между зубцами ротора и второго полюса оказываются удлиненными и искривленными. Появляется механический момент, под действием которого ротор повернется в сторону уменьшения длин магнитных силовых линий в зазоре между зубцами ротора и статора на угол Δ , равный по дуге половине ширины зубца. Направление движения ротора на рисунке показано стрелкой.

Например, если на роторе 30 зубцов, то один зубец со впадиной занимает сектор в 12° . Сдвигка на половину зубца составляет 3° . Эта величина и составит минимальный шаг, при переключении на обмотку второго полюса.

Функциональная схема системы управления ШД показана на рис. 3.59. Она состоит из блока формирования импульсов в зависимости от управляющего сигнала, коммутатора и четырех усилителей мощности, запитывающих подключаемые коммутатором обмотки статора.



Рис. 3.59. Функциональная схема системы управления ШД

Шаговый двигатель как элемент системы управления может быть отнесен к интегрирующему звену, так как скорость изменения угла поворота его вала пропорциональна частоте переключения обмоток статора. Однако частота переключений имеет ограничение сверху, так как переходные процессы в виде угловых колебаний вала ротора на каждом очередном шаге должны заканчиваться к моменту следующего переключения.

Сформулируем основные достоинства и недостатки разных типов ШД.

Шаговый двигатель с активным ротором способен удерживать свое угловое положение ротора при отключении обмоток статора от сети за счет собственного момента, развиваемого ротором, об-

условленного наличием собственных магнитов на роторе. Однако этот тип двигателя обладает относительно большим шагом. Шаговый двигатель с реактивным ротором может быть сделан на относительно малые шаги, но он не способен сохранять свое положение в отсутствие питания на обмотке статора.

Бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ) или вентильный двигатель. Двигатели постоянного тока как исполнительные элементы обладают линейными статическими характеристиками, как по управлению, так и по моменту, что делает их применение в системах управления весьма привлекательным. Однако наличие коллекторного узла с его трущимися щеточными контактами существенно понижает надежность работы этих двигателей, увеличивает момент потерь, создает высокочастотные помехи для другой аппаратуры. Стоимость двигателей постоянного тока также достаточно высока в сравнении с двигателями переменного тока. Все эти факторы ограничивают область применения этих двигателей.

Современная электроника позволяет произвести замену механического коммутатора, каковым является коллекторный узел двигателя постоянного тока, на бесконтактный коммутатор, и построить бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). За основу БДПТ берется синхронный двигатель с трехфазной обмоткой статора и ротор с одной парой полюсов в виде постоянного магнита.

Функциональная схема БДПТ представлена на рис. 3.60. Здесь в качестве коммутатора фазных обмоток статора используется силовой блок, аналогичный блоку, используемому в частотном преобразователе для трехфазного асинхронного двигателя (см. рис. 3.48). Логика и последовательность открытия и закрывания шести транзисторов сохраняется той же, что представлена в табл. 3.2, т. е. в каждый момент времени в открытом состоянии находятся три транзистора в соответствии с табл. 3.2. Однако логика переключения привязана не к задаваемой величине Δt , а к угловому положению вала ротора двигателя, которое определяется датчиком положения на валу. Например, если нулевому положению вала соответствует состояние транзисторов, приведенное в первой строке табл. 3.2, то датчик положения вала должен перевести транзисторы из состояния первой строки табл. 3.2 в состояние, показанное во второй строке этой таблицы. Вал ротора при этом повернется на 60° , и датчик положения станет переводить транзисторы в положение, показанное в третьей строке. Ротор повернется еще на 60° и т. д. Скорость вращения ротора при этом будет зависеть от напряжения источника питания и момента нагрузки на валу двигателя. Статические и динамические характеристики подобного БДПТ оказываются близкими к характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при якорном управлении.

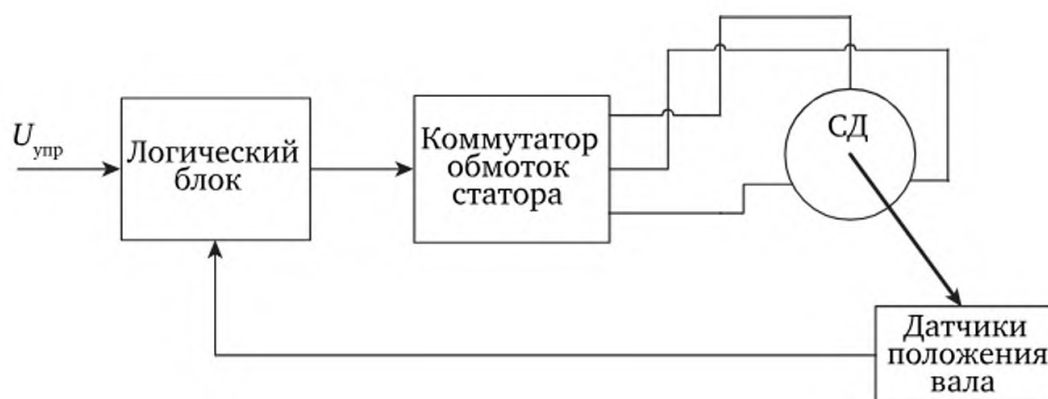


Рис. 3.60. Функциональная схема БДПТ

В качестве датчика положения БДПТ часто используются датчики Холла, встроенные по периметру статора двигателя.

3.3. Электромеханические устройства измерения рассогласования

В данном параграфе рассматриваются измерители рассогласования (ИР), используемые в автоматических системах дистанционной передачи угла. Такие измерители в основном используются в силовых следящих системах (сервоприводах), когда передаваемый угол задается оператором. Однако составляющие элементы таких измерителей во многих случаях могут использоваться в качестве самостоятельных датчиков углового положения вала. Их показания часто далее преобразуются в цифровой сигнал и используются по назначению в автоматизированных системах.

Структурная схема измерителя рассогласования в составе обобщенной функциональной схемы следящей системы показана на рис. 3.61.

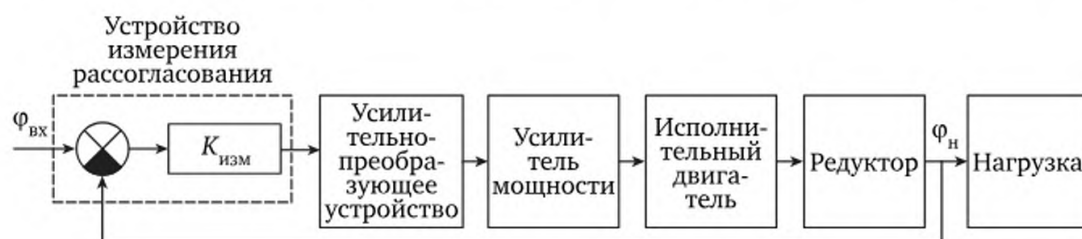


Рис. 3.61. Структурная схема измерителя рассогласования в составе обобщенной функциональной схемы следящей системы

Будем далее рассматривать в разделе два наиболее распространенных типа ИР:

- 1) потенциометрические;
- 2) трансформаторные.

3.3.1. Потенциометрические измерители рассогласования

Потенциометрические ИР реализуют на круговых потенциометрах. На рис. 3.62 показаны различные круговые потенциометры с проволочными обмотками (2) и контактными движками (1).

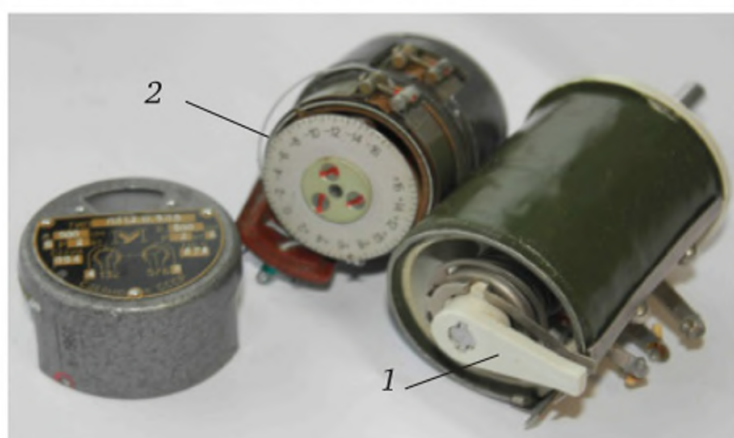


Рис. 3.62. Круговые проволочные потенциометры

На рис. 3.63 дается упрощенное представление кругового потенциометра (а) и его изображение на схемах (б).

Круговые потенциометры имеют проволочную обмотку, располагаемую на цилиндрической подложке из изоляционного материала. Концы обмотки выведены наружу. Обмотка в виде проволоки с определенным удельным сопротивлением. По торцевой поверхности обмотки по кругу может перемещаться движок со скользящим контактом. Сигнал с движка также выводится наружу.

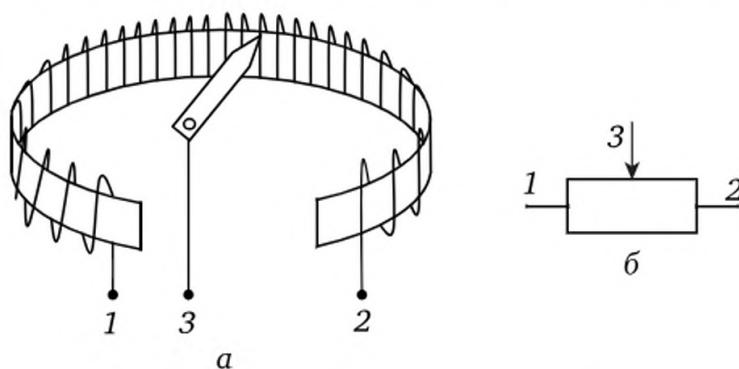


Рис. 3.63. Упрощенное представление кругового потенциометра (а) и его изображение на схемах (б)

Для реализации потенциометрических ИР используют два круговых проволочных потенциометра. Движок одного потенциометра соединен со входным валом, положение которого обычно задает оператор (это потенциометр-датчик), а движок другого потенциометра (потенциометр-приемник) соединен с валом нагрузки. Схема соединений потенциометров, показанная на рис. 3.64, образует по-

тенциометрический ИР. Положение движков потенциометров определяет входной угол и угол поворота нагрузки. Это могут быть углы относительно какого-либо направления (как отмечено на рисунке), либо абсолютные значения этих углов относительно точек начала отсчета. Фактически подобный ИР представляет собой измерительный мост, схема которого представлена на рис. 3.65.

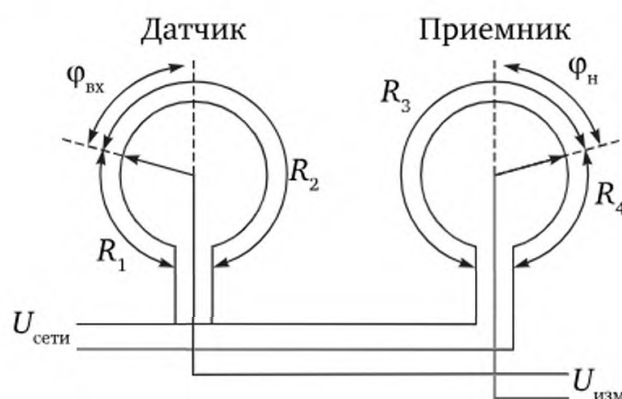


Рис. 3.64. Потенциометрический измеритель рассогласования

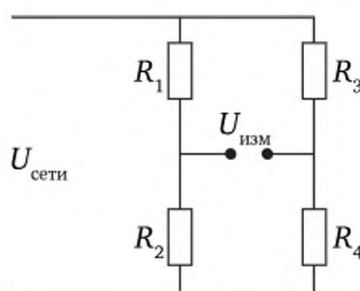


Рис. 3.65. Схема замещения ИР на потенциометрах

Выходное напряжение моста определяется соотношением

$$U_{\text{изм}} = K_{\text{изм}} (\varphi_{\text{вх}} - \varphi_{\text{вых}}),$$

где $K_{\text{изм}} = \frac{U_{\text{сети}}}{\varphi_{\text{макс}}}$; $\varphi_{\text{макс}}$ — максимальный угол поворота движка потенциометра.

При согласованном положении движков потенциометров $U_{\text{изм}} = 0$ или, соответственно,

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Поскольку $R_1 + R_2 = R_3 + R_4$, то в этом случае всегда $R_1 = R_3$; $R_2 = R_4$.

Недостатком рассмотренного ИР является сектор, выпадающий из управления, так как обычные потенциометры имеют ограниченный угол поворота, меньший 360° .

Для построения ИР на потенциометрах без ограничения угла поворота используются специальные круговые потенциометры со сплошной обмоткой по кругу и с тремя выводами через 120° . У этих потенциометров делается по два диаметрально расположенных, но изолированных друг от друга скользящих контакта (движка). Устройство такого ИР схематично показано на рис. 3.66. Здесь трехпроводная линия связывает корпус потенциометра-датчика с корпусом потенциометра-приемника. Скользящие контакты движка потенциометра-датчика подсоединяются к источнику сетевого напряжения $U_{\text{сети}}$, а выходное напряжение ИР снимается со скользящих контактов потенциометра-приемника.



Рис. 3.66. Устройство ИР на потенциометрах без ограничения угла поворота

Анализ работы данного устройства по его принципиальной схеме гораздо сложнее предыдущего варианта, но приводит к аналогичному результату: $U_{\text{изм}} = K_{\text{изм}}(\varphi_{\text{вх}} - \varphi_{\text{вых}})$. Однако следует отметить, что согласованному положению соответствует взаимноперпендикулярное пространственное расположение движков. Поэтому в следящих системах для устранения этого эффекта разворачивают и закрепляют корпуса датчика и приемника со сдвигом в пространстве друг относительно друга на 90° . Это же делается и для трансформаторных ИР, которые рассматриваются далее.

Достоинства ИР на потенциометрах: малый вес, габариты, могут работать как на постоянном, так и на переменном токе.

Недостатки: трущиеся контакты; дискретность статической характеристики из-за перескока контактов с витка на виток; относительно невысокая надежность; возникающие высокочастотные помехи при движении контактов.

Погрешности ИР на потенциометрах в основном определяются качеством проволоки, которая идет на обмотку потенциометра. Здесь выделяют два вида погрешности:

1) погрешность, связанная с отклонением общей величины сопротивления потенциометра от номинального значения

$$\pm \frac{\Delta R}{R_{\text{ном}}} \cdot 100 \%;$$

2) погрешность, связанная с отклонением от линейного вида статической характеристики потенциометра

$$\pm \frac{\left| \left(\frac{\Delta R}{\Delta \varphi} \right)_{\max} - K_{\pi} \right|}{K_{\pi}} \cdot 100 \%,$$

где $K_{\pi} = \frac{R_{\text{ном}}}{\varphi_{\text{макс}}}$.

В процессе изготовления потенциометров все они проходят проверку, в результате чего изготовленные потенциометры разделяются на четыре группы по классам точности в соответствии с табл. 3.3. Все, что не попадает в группу III класса точности, относится к браку и отправляется на переделку.

Таблица 3.3

Классы точности потенциометров

Класс точности	$\pm \frac{\Delta R}{R_{\text{ном}}} \cdot 100 \%$	$\pm \frac{\left \left(\frac{\Delta R}{\Delta \varphi} \right)_{\max} - K_{\pi} \right }{K_{\pi}} \cdot 100 \%$
I	$\pm 0,25 \%$	$\pm 5 \%$
II	$\pm 0,5 \%$	$\pm 5 \%$
III	$\pm 1 \%$	$\pm 10 \%$

Погрешность измерителя рассогласования $\delta_{\text{ир}}$ любого типа оценивается как

$$\delta_{\text{ир}} = \sqrt{\delta_{\text{дат}}^2 + \delta_{\text{пр}}^2}. \quad (3.28)$$

3.3.2. Трансформаторные измерители рассогласования

3.3.2.1. Измерители рассогласования на сельсинах

Сельсин, используемый для создания измерителя рассогласования — электрическая машина, по конструкции схожая с синхронным генератором или с синхронным двигателем. На статоре его располагается трехфазная обмотка, а на роторе однофазная, концы которой с помощью двух коллекторных колец и щеток выводятся наружу. Существуют сельсины, у которых на статоре располагается однофазная обмотка, а на роторе — трехфазная, концы которой через три коллекторных кольца со щетками выводятся наружу. Оба типа сельсинов могут быть использованы в индикаторном режиме при построении систем синхронной связи, однако для постро-

ения ИР для следящих систем используют первый тип сельсинов. На рис. 3.67 представлены сельсины первого типа (1).

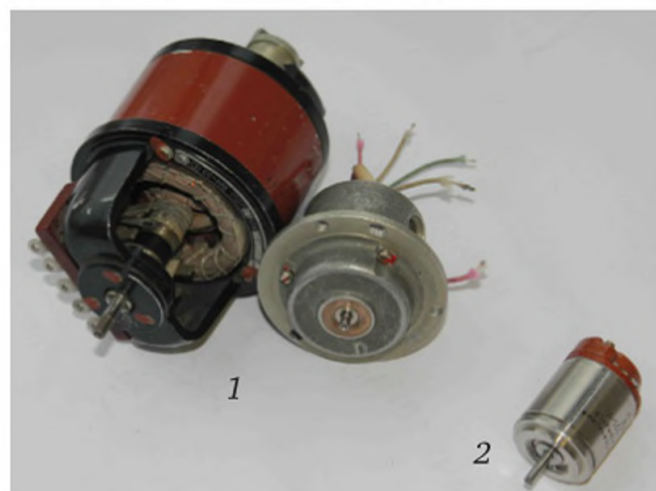


Рис. 3.67. Сельсины (1) и вращающийся трансформатор (2)

Слева на рисунке сельсин для работы в сети 50 Гц, а справа для работы в сети 400 Гц. Здесь же показан вращающийся трансформатор (2) для работы в сети 400 Гц. Об этих трансформаторах речь пойдет дальше.

Схема включения сельсинов в индикаторном режиме показана на рис. 3.68. Разнесенные в пространстве сельсины соединены друг с другом трехпроводной линией связи, подключаемой к статорным обмоткам. При подключении обмоток роторов к однофазной сети переменного тока в обмотках статоров наводятся ЭДС. В случае согласованного пространственного положения роторов друг относительно друга, наводимые ЭДС в обмотках статоров будут равными и противоположно направленными друг к другу. В результате в трехпроводной линии, соединяющей обмотки статоров, будут отсутствовать уравнивающие токи. Эти токи возникнут, если роторы в пространстве будут повернуты на разные углы. В этом случае появление уравнивающих токов в трехпроводной линии приведет к возникновению равных и противоположно направленных моментов, стремящихся к совмещению угловых положений роторов в пространстве.

Если вращать один из роторов, второй будет за ним поворачиваться (будет отслеживать поворот) так, чтобы уравнивающие токи в линиях связи в итоге отсутствовали. Подобная система синхронной передачи угла является маломощной следящей системой. Она не может развивать большой момент, парирующий внешний момент на одном из валов.

Сельсины в трансформаторном режиме образуют схему, показанную на рис. 3.69, которая используется в следящих системах в качестве измерителя рассогласования.

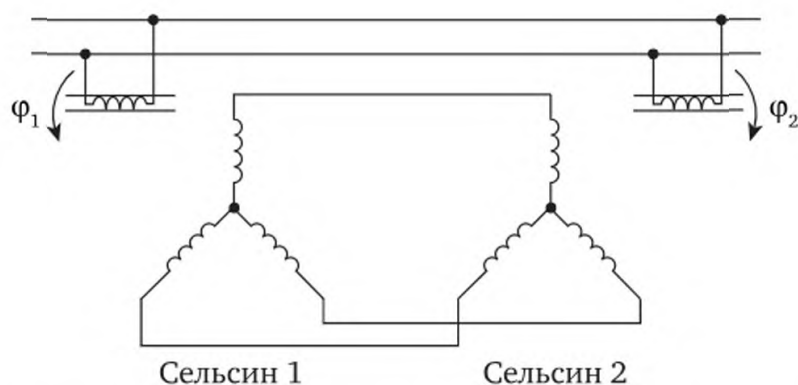


Рис. 3.68. Схема соединения сельсинов в индикаторном режиме

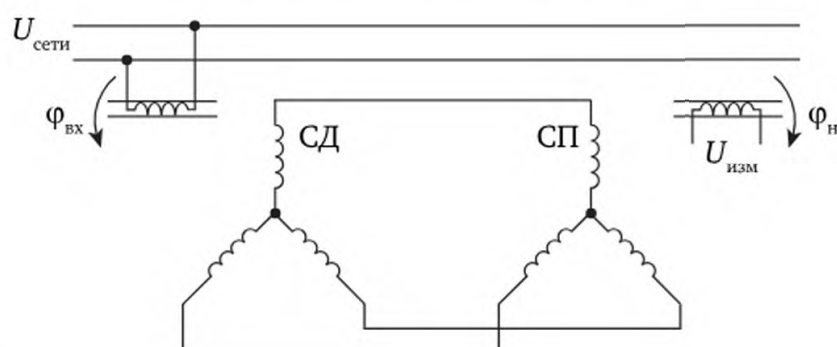


Рис. 3.69. Схема соединения сельсинов в трансформаторном режиме

Здесь также обмотки статоров сельсинов соединены трехпроводной линией. Ротор сельсина-датчика подключается к однофазной сети переменного тока, а с ротора сельсина-приемника снимается сигнал, пропорциональный углу рассогласования между положениями роторов сельсинов. Подобная схема образует единый трансформатор, общим магнитопроводом которого являются статоры сельсинов, соединенные трехпроводной линией, а обмотки роторов являются первичной и вторичной обмотками этого пространственного трансформатора. Особенностью такого трансформатора является то, что его обмотки могут менять пространственное положение друг относительно друга и по отношению к единому магнитопроводу.

Поясним с помощью рис. 3.70 принцип работы такого ИР путем представления его в виде трансформатора, у которого одна обмотка (пусть вторичная) зафиксирована, а первичная поворачивается на разные углы. При этом первичная обмотка запитывается сетевым напряжением, а на вторичной обмотке фиксируется амплитуда выходного переменного напряжения в зависимости от взаимного углового расположения обмоток.

За согласованное положение принимается взаимно перпендикулярное положение обмоток роторов сельсинов в пространстве. Знак

рассогласования определяется по фазовому сдвигу между напряжением сети и выходному напряжению ИР (напряжение на обмотке ротора сельсина-приемника). Этот фазовый сдвиг может быть либо 0, либо 180°.

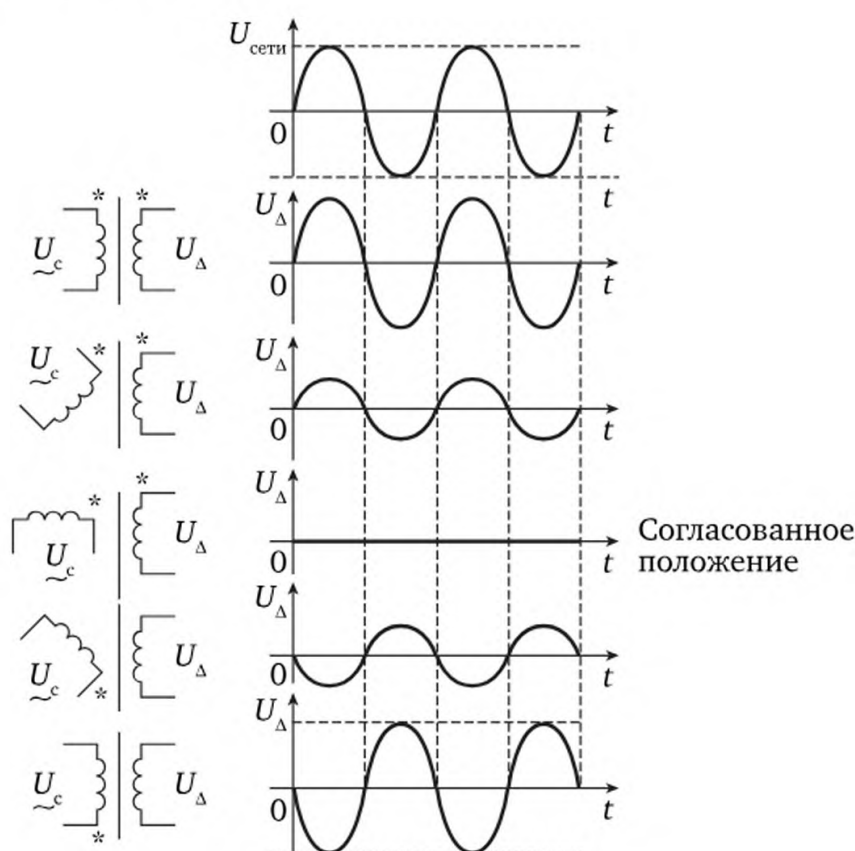


Рис. 3.70. Принцип работы ИР на сельсинах в трансформаторном режиме

Амплитуда переменного выходного напряжения U_{Δ} пропорциональна углу рассогласования между роторами, а знак рассогласования соответствует фазе выходного напряжения по отношению к сетевому напряжению (фаза 0°, например, — положительное рассогласование, а 180° — отрицательное рассогласование).

Сигнал рассогласования такого ИР в виде переменного напряжения носит название *амплитудно-модулированного сигнала*, или АМ-сигнала.

Согласованное положение роторов считается таким, когда они сдвинуты друг относительно друга на 90°. Для учета этого явления в системах управления разворачивают в пространстве на 90° друг относительно друга и закрепляют статоры сельсинов. Подобная операция, как отмечалось выше, производится с ИР на потенциометрах без ограничения угла поворота.

Виды погрешностей ИР на сельсинах:

1) технологическая погрешность, связанная с качеством его изготовления;

- 2) погрешность, связанная с реакцией нагрузки;
- 3) динамическая погрешность.

Технологическая погрешность определяется классом точности сельсинов в соответствии с табл. 3.4.

Таблица 3.4

Классы точности сельсинов

Класс точности	Датчики	Приемники
I	$\pm 0,25^\circ$	$\pm 0,25^\circ$
II	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,5^\circ$
III	$\pm 1,0^\circ$	$\pm 0,75^\circ$

Технологическая погрешность схемы ИР на сельсинах оценивается по формуле (3.28).

Погрешность, связанная с реакцией нагрузки. Возникновение этой погрешности поясняется рис. 3.70. Подключение обмотки ротора сельсина-приемника к нагрузке R_n вызывает появление тока в этой цепи и магнитного потока реакции ϑ_2 . Этот поток раскладывается на две составляющие: продольную ϑ_{2d} , которая ослабляет основной поток ϑ_0 , создаваемый током в обмотке ротора сельсина-датчика, и поперечную составляющую ϑ_{2q} . Ослабление основного потока оказывается зависимым от угла рассогласования φ , т. е. эта погрешность нелинейно зависит от величины угла рассогласования. Чем больше сопротивление нагрузки, тем меньше погрешность от реакции нагрузки. Именно поэтому ИР стараются нагружать на высокоомную нагрузку.

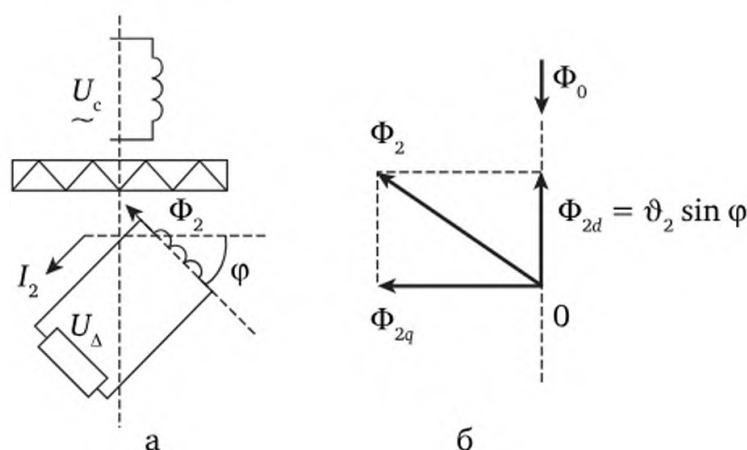


Рис. 3.71. Влияние реакции нагрузки

Динамическая погрешность. Эта погрешность связывается с переходными процессами, которые фиксируются обмоткой ротора сельсина-приемника. Например, если вращать ротор сельсина-дат-

чика с частотой $\omega_{вр}$, а ротор сельсина-приемника зафиксировать, то сигнал, снимаемый с обмотки ротора сельсина-приемника U_{Δ} , будет иметь вид, показанный на рис. 3.72.

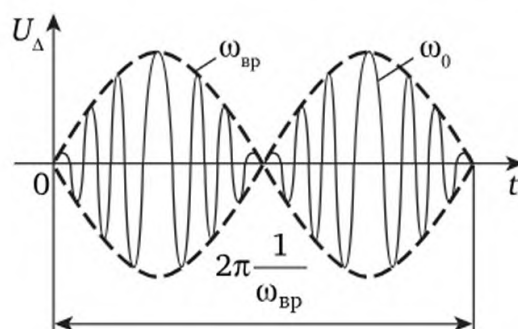


Рис. 3.72. Сигнал, снимаемый с обмотки ротора сельсина-приемника при равномерном вращении сельсина-датчика с частотой $\omega_{вр}$

Магнитный поток, создаваемый за счет протекания переменного тока в обмотке ротора сельсина-датчика с частотой сети ω_0 , описывается следующим соотношением:

$$\vartheta_0(t) = \vartheta_{\text{макс}} \cdot \sin(\omega_{вр}t) \cdot \sin(\omega_0t).$$

В соответствии с законом электромагнитной индукции

$$U_{\Delta} = -k \frac{d\Phi_0}{dt} = -k\Phi_{\text{макс}} (\omega_0 \sin(\omega_{вр}t) \cdot \cos(\omega_0t) + \omega_{вр} \cos(\omega_{вр}t) \cdot \sin(\omega_0t)).$$

В полученном соотношении второе слагаемое определяет динамическую погрешность ИР в данном примере. Эта погрешность отсутствует в установившемся режиме, когда отсутствует взаимное перемещение роторов сельсинов друг относительно друга. Чем выше скорость одного ротора относительно другого, тем больше динамическая погрешность.

3.3.2.2. Измерители рассогласования на вращающихся трансформаторах

Вращающийся трансформатор (ВТ) — это электрическая машина, на статоре и роторе которой размещены по две обмотки, сдвинутые друг относительно друга на 90° . Пример его представлен на рис. 3.67 (2). В технике находят применение три вида ВТ: синусно-косинусный, линейный, и ВТ-построитель. Для создания измерителя рассогласования обычно используют синусно-косинусный ВТ, или СКВТ.

Измеритель рассогласования на ВТ выполняют по той же схеме, что и ИР на сельсинах. Статорные обмотки ИР соединяются между собой четырехпроводной линией связи, как показано на рис. 3.73. Одна роторная обмотка ВТ-датчика присоединяется к сети и одна

обмотка ротора ВТ-приемника используется для измерения сигнала рассогласования. Для ослабления погрешности ИР от реакции нагрузки производят симметрирование ВТ с использованием свободных обмоток роторов. Этот вопрос рассматривается далее.

Так же, как ИР на сельсинах, измеритель рассогласования на ВТ имеет три вида погрешностей: технологическую, от реакции нагрузки и динамическую.

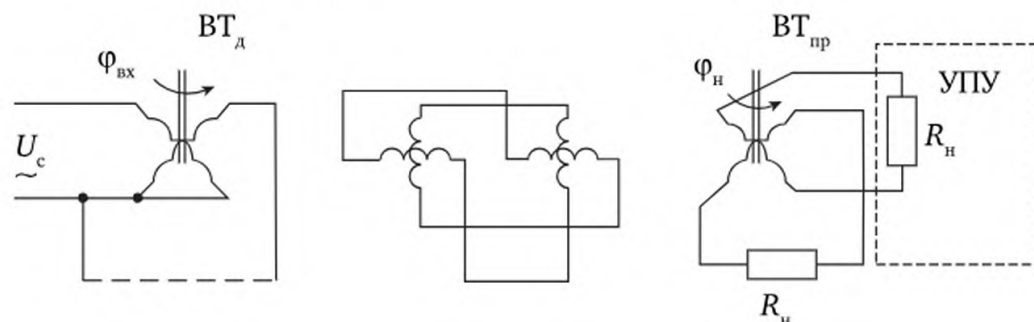


Рис. 3.73. Схема ИР на вращающихся трансформаторах

Технологическая погрешность определяется классом точности ВТ. Существует четыре класса точности, данные по которым представлены в табл. 3.5. Погрешность в таблице задана в угловых минутах.

Таблица 3.5

Классы точности ВТ

Класс точности	0	I	II	III
ВТ	$\pm 3'$	$\pm 8'$	$\pm 16'$	$\pm 22'$

Общая технологическая погрешность ИР на ВТ оценивается с использованием формулы (3.28). Более высокое качество изготовления ВТ обеспечивает уменьшение общей погрешности ИР по сравнению с измерителями рассогласования на сельсинах.

Погрешность от реакции нагрузки измерителя на ВТ можно сделать независимой от угла рассогласования, и тогда ее можно учитывать в алгоритмах управления как постоянную, систематическую погрешность. Делается это путем симметрирования ВТ. Рассмотрим процедуру симметрирования ВТ-приемника в схеме ИР, изображенной на рис. 3.73.

Вторая, свободная обмотка ротора ВТ-приемника нагружается на резистор, величина сопротивления которого равна входному сопротивлению усилителя, на который подается сигнал рассогласования с первой обмотки ротора ВТ-приемника. В этом случае, как показано на рис. 3.74, результирующий размагничивающий поток

$$\vartheta_d = \vartheta_{2d} = \vartheta_{2Ad} = \vartheta_{2Bd}.$$

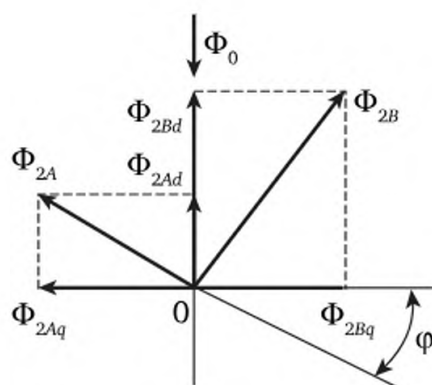


Рис. 3.74. Потоки реакций симметрично нагруженных обмоток ротора ВТ-приемника

Покажем, что этот размагничивающий поток оказывается постоянным и независимым от угла рассогласования φ . Потоки реакции от каждой из обмоток A и B при угле рассогласования φ будут:

$$\vartheta_{2A} = \vartheta_2 \sin \varphi;$$

$$A_{2B} = \vartheta_2 \cos \varphi.$$

Разложение этих потоков по осям координат дает составляющие:

$$\vartheta_{2Aq} = -\vartheta_2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi;$$

$$\vartheta_{2Ad} = \vartheta_2 \sin \varphi \cdot \sin \varphi;$$

$$\vartheta_{2Bq} = \vartheta_2 \cos \varphi \cdot \sin \varphi;$$

$$\vartheta_{2Bd} = \vartheta_2 \cos \varphi \cdot \cos \varphi;$$

В результате суммарные потоки по осям будут:

- продольный

$$\vartheta_d = \vartheta_{2Ad} + \vartheta_{2Bd} = \vartheta_2;$$

- поперечный

$$\vartheta_q = \vartheta_{2Aq} + \vartheta_{2Bq} = 0.$$

Таким образом, суммарный поток, благодаря симметричной нагрузке обмоток ротора, оказывается постоянным, независимым от угла рассогласования. Его влияние всегда может быть учтено как систематическая погрешность. Точно так же полезно свободную, вторую обмотку ВТ-датчика нагрузить на резистор, с сопротивлением, соответствующим внутреннему сопротивлению источника переменного напряжения. Обычно это сопротивление практически равно нулю, и тогда эту обмотку просто закорачивают. Такая закоротка показана в виде пунктирной линии на рис. 3.73.

Динамическая погрешность ИР на ВТ аналогична динамической погрешности ИР на сельсинах.

3.3.3. Вопросы повышения точности измерителей рассогласования

Технологическая погрешность ИР (3.28) входит как составляющая в общую ошибку системы управления. Ошибка системы зависит от режима ее работы, но погрешность ИР при этом остается неизменной. Это обстоятельство во многих случаях вынуждает разработчиков систем искать пути увеличения точности ИР, использующих стандартные сельсины или ВТ. Основной путь решения данной проблемы — создание двухотсчетных (двухканальных) ИР. В этом случае в системе используются два параллельно работающих ИР, образующих два канала измерения грубого (ГО) и точного (ТО) отчета. Канал ГО работает, как рассматривалось выше, при больших рассогласованиях в системе. По мере уменьшения сигнала рассогласования влияние канала ГО ослабевает и происходит плавное увеличение сигнала ошибки, измеряемое каналом ТО. Подобное переключение осуществляется специальным электронным селектором. Кроме того, как между датчиками ГО и ТО, так и между приемниками ТО и ГО стоят специальные повышающие механические редукторы с коэффициентом редукции $15 \div 30$. Это не силовые, а специальные измерительные редукторы высокого качества изготовления с применением разрезных шестерен для устранения люфта. Поясним на числовом примере смысл введения подобных редукторов.

Пусть коэффициент передачи ИР на больших углах рассогласования составляет 1 В/градус, коэффициент редукции равен 30. Тогда при угле рассогласования в 30° канал ГО зафиксирует 30 В. При угле рассогласования 1° на выходе канала ГО будет 1 В, а на выходе канала ТО — 30 В, и система здесь уже будет работать по каналу ТО. При этом чувствительность ИР увеличилась в 30 раз, а технологическая погрешность осталась неизменной. В обратном пересчете именно технологическая погрешность ИР по каналу ТО сокращается в 30 раз.

Очевидными недостатками такого способа увеличения точности ИР является его высокая стоимость и рост габаритов ИР. Развитие техники привело к созданию измерительных трансформаторов с электрической редукцией — редуктосинов и индуктосинов. Смысл электрической редукции тот же, что закладывается в конструкцию реактивных шаговых двигателей для уменьшения их шага. Эти приборы являются многополюсными трансформаторами с разным числом полюсов на статоре и роторе для САУ с малым углом поворота.

Индукционные редуктосины — это бесконтактные СКВТ. Коэффициент редукции — до 256. Ротор без обмотки с количеством зуб-

цов (полюсов) меньшим, чем число полюсов статора. На полюсах статора размещены: обмотка возбуждения (направление намотки чередуется на соседних полюсах), синусная и косинусная обмотки намотаны через полюс и чередуются друг относительно друга. Таким образом, на каждом полюсе по две обмотки: одна — обмотка возбуждения и другая — либо синусная, либо косинусная.

Недостаток — сложность конструкции и отсюда высокая стоимость изделия.

Проще и значительно дешевле индуктосины. В их основе два диска с печатными обмотками. Роторная обмотка однофазная, а обмотка статора двухфазная. Зазоры между дисками — до 0,1 мм. Обмотки, распределенные с разными шагами для ротора и статора. Устройство — по тому же принципу, как у редуктосина. Диаметры дисков 300 мм при коэффициенте редукции 256, точность до 1 угловой секунды.

Недостаток — малая амплитуда выходной ЭДС.

Рассмотренные выше подходы к увеличению точности ИР систем управления и недостатки этих устройств привели к построению ИР на базе энкодеров, которые рассматриваются в теме 2.

3.4. Пример выполнения этапа выбора исполнительного двигателя с учетом силового редуктора при проектировании угловой следящей системы

Как отмечалось в п. 1.5.3, этап выбора двигателя и расчет редуктора для проектируемой угловой следящей системы, в свою очередь, состоит из ряда этапов.

1. Предварительный выбор двигателя и оценка передаточного числа редуктора. Требуемая мощность на валу выбираемого двигателя следящей системы, в зависимости от условий ТЗ, может оцениваться по одному из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} P_{\text{треб}} &= 2M_{\text{н}}\omega_{\text{нм}}; \\ P_{\text{треб}} &= (2J_{\text{н}}\epsilon_{\text{нм}} + M_{\text{н}})\omega_{\text{нм}}; \\ P_{\text{треб}} &= 2(J_{\text{н}}\epsilon_{\text{нм}} + M_{\text{н}})\omega_{\text{нм}}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Смысл формул (3.29) заключается в том, что требуемая мощность со стороны нагрузки завышается при предварительной оценке требуемой мощности со стороны двигателя с учетом будущих потерь в самом двигателе, редукторе, усилителе мощности и т. д. Одновременное применение всех соотношений (3.29) позволяет оценить возможный диапазон требуемой мощности выбираемого исполнительного двигателя. Используя цифры задания на проектирование следящей системы, представленные в табл. 1.1, получаем

$1,4 \text{ Вт} \leq P_{\text{треб}} \leq 2,3 \text{ Вт}$. В табл. 3.6 представлены технические данные наиболее подходящего асинхронного двухфазного исполнительного двигателя из рекомендованной в задании серии ЭМ-М.

Таблица 3.6

Технические данные выбранного двигателя серии ЭМ-М

Тип	$U_{\text{ном}},$ В	$P_{\text{ном}},$ Вт	$M_{\text{п}} \cdot 10^{-3},$ Н · м	$\omega_{\text{хх}},$ рад/с	$J_{\text{дв}} \cdot 10^{-8},$ кг · м ²	$R_{\text{у}},$ Ом	$x_{\text{у}},$ Ом	$D_{\text{вала}},$ мм
ЭМ-2М	60	2,47	11,8	628	51,0	173	166	3

В табл. 3.6 для выбранного двигателя представлены номинальные значения напряжения обмотки управления $U_{\text{ном}}$ и мощности на валу $P_{\text{ном}}$, пусковой момент $M_{\text{п}}$, скорость холостого хода $\omega_{\text{хх}}$, момент инерции ротора $J_{\text{дв}}$, активной $R_{\text{у}}$ и реактивной $X_{\text{у}}$ составляющих сопротивления обмотки управления при заторможенном роторе и диаметр вала двигателя.

Номинальные значения момента $M_{\text{ном}}$ и скорости $\omega_{\text{ном}}$ приближенно определяют из соотношений

$$M_{\text{ном}} = \gamma M_{\text{п}}; \omega_{\text{ном}} = \gamma \omega_{\text{хх}},$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{P_{\text{ном}}}{M_{\text{п}} \omega_{\text{хх}}}} = 0,577$.

Линеаризованная механическая характеристика двигателя для скоростей в диапазоне $0 \leq \omega_{\text{дв}} \leq 1,2 \omega_{\text{ном}}$ достаточно точно описывается зависимостью

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{п}} - a \omega_{\text{дв}}. \quad (3.30)$$

При этом

$$M_{\text{п}} = b U_{\text{ном}},$$

где $b = \frac{M_{\text{п}}}{U_{\text{ном}}} = 0,000197 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{В}}; a = \frac{M_{\text{п}} - M_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = 0,0000136 \frac{\text{Н} \cdot \text{мс}}{\text{рад}}$.

Обычно нагрузка в следящих системах вращается с относительно невысокими скоростями, а общий (суммарный) механический момент на валу нагрузки $M_{\text{сн}}$ состоит из двух компонент динамического момента и момента сил сухого трения (в соответствии с ТЗ, представленным в табл. 1.1)

$$M_{\text{сн}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{н}} = J_{\text{н}} \varepsilon_{\text{н}} + M_{\text{н}} \quad (3.31)$$

может достигать значительных значений. Первое слагаемое в формуле (3.31) — это динамический момент, а второе слагаемое может содержать такие составляющие как момент небаланса, момент сил сухого трения, момент вязкого трения и т. д. В данном расчете вто-

рое слагаемое (3.31) — это наиболее распространенный на практике момент сил сухого трения

$$M(t) = M \cdot \text{sign} \omega. \quad (3.32)$$

В отличие от нагрузки, исполнительный электрический двигатель следящей системы обладает относительно небольшим крутящим моментом при высоких скоростях вращения ротора и при этом может развивать необходимую мощность для обеспечения движения нагрузки. Для согласования этих противоречивых условий работы нагрузки и исполнительного двигателя используется силовой редуктор. Его функциональная схема представлена на рис. 3.75.

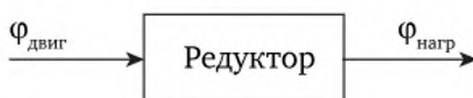


Рис. 3.75. Функциональная схема силового редуктора

Силовой редуктор, как элемент системы управления, является в первом приближении пропорциональным звеном с коэффициентом передачи:

$$k_{\text{ред}} = \frac{1}{i_{\text{ред}}} < 1,$$

где, по определению, передаточное число редуктора

$$i_{\text{ред}} = \frac{\varphi_{\text{дв}}}{\varphi_{\text{н}}} = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{\varepsilon_{\text{дв}}}{\varepsilon_{\text{н}}} > 1.$$

Таким образом, в следящих системах не бывает повышающих силовых редукторов, т. е. всегда

$$k_{\text{ред}} = \frac{1}{i_{\text{ред}}} < 1.$$

Для идеального редуктора с $\eta_{\text{ред}} = 1$ вся мощность, развиваемая двигателем, полностью передается нагрузке $P_{\text{дв}} = P_{\text{н}}$. В реальном редукторе $\eta_{\text{ред}} < 1$, поэтому

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{н}} \frac{1}{\eta_{\text{ред}}}.$$

Таким образом,

$$M_{\text{дв}} \omega_{\text{ред}} \eta_{\text{ред}} = M_{\text{н}} \omega_{\text{н}}.$$

В соответствии с заданием при предварительных расчетах берется $\eta_{\text{р}} = 0,8$. Оценка передаточного числа редуктора чаще все-

го совершается путем приведения моментов (3.31), действующих на валу нагрузки к валу двигателя:

$$M'_H = \frac{J_H \cdot \varepsilon_H + M_H}{i_p \cdot \eta_p} (\eta_p = 0,8).$$

С учетом собственного момента инерции ротора двигателя получаем выражение для момента, развиваемого двигателем:

$$M_{дв} = J \frac{d\omega}{dt} + M'_H. \quad (3.33)$$

Замена переменной $\omega = \omega_{HM} i_p$ в формуле (3.30) и $\varepsilon = \varepsilon_{HM} i_p$ в (3.33) и дальнейшее их совместное решение

$$M_H - a\omega_{HM} i_\delta = \left(J_{дв} + \frac{J_H}{i_\delta^2 \eta} \right) \varepsilon_{HM} i_\delta + \frac{M_H}{i_\delta \eta}$$

задает диапазон допустимых значений передаточных чисел редуктора. Для рассматриваемого примера $4,8 \leq i_p \leq 104$. Внутри полученного диапазона возможных значений передаточного числа редуктора момент, развиваемый двигателем, определяемый выражением (3.30), превышает требуемый момент, определяемый нагрузкой (3.33). В этом случае выполняется условие пригодности двигателя по моменту.

Обычно стараются выбрать передаточное число редуктора побольше с тем, чтобы уменьшить постоянную времени соединения «двигатель — редуктор — нагрузка». Однако выбранное передаточное число редуктора должно обеспечивать пригодность двигателя по скорости и перегреву.

В силу того, что при проведении расчетов допустимых передаточных чисел редуктора использовалась линеаризация части статической характеристики асинхронного двигателя, ограниченная номинальным значением его частоты вращения, то желательно, чтобы

$$i_p \omega_{HM} \leq (1,1 \div 1,2) \omega_{дв.ном}.$$

Отношение номинальной частоты вращения двигателя к максимальной частоте вращения нагрузки дает оптимальное (в смысле скорости) значение $i_p = 140,5$. Однако полученное значение не удовлетворяет условию по моменту.

Зададим $i_p = 90$. Очевидно, такое передаточное число редуктора удовлетворяет условиям и по моменту, и по скорости. Проведем проверку пригодности двигателя с таким передаточным числом редуктора на перегрев.

Момент сил сухого трения на валу нагрузки (3.32) при равномерном вращении вала в одну сторону является постоянной величиной,

что и позволяет оценивать диапазон допустимых передаточных чисел редуктора. В режиме синусоидальной заводки, определяемой заданием на проектируемую систему, нагрузка совершает колебательные движения, с конкретной амплитудой и частотой поворота вала. В этом режиме двигатель испытывает большие нагрузки из-за смены знака момента сопротивления на валу двигателя. Условием отсутствия перегрева двигателя в этом режиме является значение среднеквадратического момента нагрузки на валу двигателя не превышающее номинальное значение момента для этого двигателя:

$$\sqrt{\left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_p^2 \eta}\right)^2 \varepsilon_{\text{нм}}^2 i_p^2 0,707^2 + \frac{M_{\text{н}}^2}{i_p^2 \eta^2}} \leq M_{\text{дв.ном}}.$$

В нашем примере среднеквадратический момент на валу двигателя при передаточном числе редуктора $i_p = 90$ составляет $0,0038 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а номинальный момент двигателя — $M_{\text{ном}} = 0,0068 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Таким образом, выбранное передаточное число силового редуктора $i_p = 90$ удовлетворяет всем рассмотренным условиям.

2. Расчет редуктора. Целью данного этапа является оценка массогабаритных характеристик проектируемого редуктора. Фактически разрабатывается ТЗ на изготовление редуктора для конструкторов-механиков и производится оценка сверху приведенного момента инерции к валу двигателя будущего редуктора, уточняется его КПД и передаточное число. Главной задачей при проектировании редуктора является минимизация его приведенного к валу двигателя момента инерции за счет оптимизации числа зацеплений (ступеней редуктора) и определенного распределения передаточных чисел между ступенями. При этом произведение этих передаточных чисел должно быть близким к передаточному числу редуктора, которое было получено ранее. Стремление к минимизации общего приведенного к валу двигателя момента инерции обеспечивает минимально возможное значение постоянной времени соединения «двигатель — редуктор — нагрузка» как единого инерционного звена в структуре проектируемой системы.

3. Проверка пригодности двигателя с учетом редуктора и других элементов системы. Полученные оценки приведенного к валу двигателя момента инерции редуктора, его КПД и уточненное значение передаточного числа редуктора используются при повторной проверке пригодности двигателя по моменту, скорости и перегреву. Если на валу двигателя находятся дополнительные элементы (например, тахогенератор), то в расчетах приведенного к валу двигателя момента инерции их моменты инерции необходимо также учитывать.

4. Определение передаточной функции исполнительного двигателя с учетом редуктора и нагрузки. Приравнивая правые части

выражений (3.30) и (3.33) друг к другу, получаем дифференциальное уравнение, описывающее динамику асинхронного двигателя с учетом параметров редуктора и нагрузки:

$$T_{\text{дв}} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} + \omega_{\text{дв}} = k_{\text{дв}} U_y - k_m \frac{M_n}{i_p \eta}, \quad (3.34)$$

где $T_{\text{дв}} = \frac{J_{\text{дв}} + J_p' + J_{\text{тг}} + \frac{J_n}{i_p^2 \eta}}{a} \approx 0,15 \text{ с}$ — постоянная времени двигателя;

$K_{\text{дв}} = \frac{b}{a} = 14,5 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$ — коэффициент передачи двигателя по напряжению; $K_m = \frac{1}{a} = 73\,530 \frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{мс}}$ — коэффициент передачи двигателя по моменту.

Если в качестве выходной координаты двигателя рассматривать не угловую скорость ротора, а угол его поворота, то, воспользовавшись преобразованием Лапласа для выражения (3.34) получаем изображение угла поворота вала нагрузки в зависимости от управляющего напряжения и момента сопротивления на валу нагрузки:

$$\varphi_n(p) = \frac{K_{\text{дв}} U_y(p) - K_m \frac{1}{i_p p} M_n(p)}{p(T_{\text{дв}} p + 1) i_p}. \quad (3.35)$$

На рис. 3.76 показана структурная схема асинхронного двигателя с учетом редуктора и нагрузки.

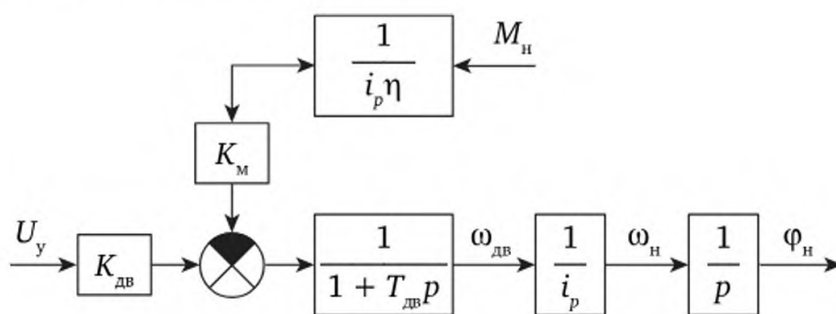


Рис. 3.76. Структурная схема исполнительного двигателя с учетом редуктора и нагрузки

3.5. Пример выполнения этапа расчета двухтактного усилителя мощности при проектировании угловой следящей системы

Схема двухтактного транзисторного усилителя мощности (УМ), работающего в классе В, представлена на рис. 3.44. Усилитель мощности нагружен на обмотку управления двигателя. Нагрузка заме-

щается последовательно включенными активным $R_y = 173 \text{ Ом}$ и реактивным $X_y = 166 \text{ Ом}$ сопротивлениями. Входной модулированный по амплитуде сигнал на несущей частоте 400 Гц поступает от предварительного усилителя, в качестве которого рекомендуется операционный усилитель К140УД7. Напряжение насыщения и допустимое минимальное сопротивление нагрузки операционного усилителя составляют $U_s = 11,5 \text{ В}$ и $R_{\text{н min}} = 2 \text{ кОм}$.

При номинальном напряжении на обмотке управления двигателя $U_{y \text{ ном}} = 60 \text{ В}$ амплитуда входного сигнала должна быть меньше U_s . Рекомендуется принять наибольшее действующее значение $U_{\text{пу max}} = 5 \text{ В}$.

Комплексный коэффициент усиления УМ на несущей частоте $\omega_0 = 2\pi f_0$ ($f_0 = 400 \text{ Гц}$):

$$W_{\text{ум}}(j\omega) = \frac{\dot{U}_y(j\omega)}{\dot{U}_{\text{пу}}(j\omega)} = K_{\text{ум}} \cdot e^{-j\Psi_1(\omega)},$$

где $K_{\text{ум}} = \frac{U_{y \text{ ном}}}{U_{\text{пу max}}} = 12$; $\Psi_1 = \arctg \frac{X_y}{R_y} = 43,8^\circ$.

Фазовый сдвиг несущей частоты Ψ_1 между входным и выходным сигналами УМ может быть скомпенсирован интегро-дифференцирующим фильтром предварительного усилителя на базе операционного усилителя К140УД7 по схеме 4, представленной в табл. 4.1. Таким образом, УМ и ПУ можно рассматривать по отношению к огибающей сигналов как безынерционные звенья с коэффициентами усиления $K_{\text{ум}}$ и $K_{\text{пу}}$.

Расчет ведут от нагрузки усилителя к его входу. Поскольку никаких дополнительных данных по проектируемому УМ нет, то можно предложить предъявлять заведомо заниженные требования к трансформаторам в схеме УМ.

Зададимся КПД трансформаторов Tr_1 и Tr_2 , которые определяются с использованием закона Кирхгофа для активных элементов приведенной к первичной обмотке схемы замещения трансформатора (см. рис. 3.6):

$$\eta_1 = \frac{R_3 \cdot \beta}{R_3 \beta + \left(r_2 + \frac{r_1}{n_1^2} \right)_{\text{Tr}_1}} = 0,9; \eta_2 = \frac{R_y}{R_y + \left(r_2 + \frac{r_1}{n_2^2} \right)_{\text{Tr}_2}} = 0,9,$$

где r_1 и r_2 — сопротивления первичной и вторичной обмоток соответствующих трансформаторов; $n_1 = (w_1 / w_2)_{\text{Tr}_1}$, $n_2 = (w_1 / w_2)_{\text{Tr}_2}$ — коэффициенты трансформации; β — коэффициент усиления по току транзистора в схеме с общим эмиттером.

Пусть $R'_3 = R_3 n_2^2 = 0,1 R_{\text{н}}$. Определим в этом случае КПД коллекторной цепи каждой из первичных обмоток Tr_2 :

$$\eta_K = \frac{R_y}{R_y + R'_3 + \left(r_2 + \frac{r_1}{n_2^2}\right)_{\text{Тр}_2}} = \frac{1}{\frac{R'_y}{R_y} + \frac{1}{\eta_2}} = 0,83.$$

Активная мощность в нагрузке P_y и активная мощность источника с учетом КПД коллекторных цепей транзисторов P_K составляют:

$$P_o = \frac{U_{yN}^2}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2}} \cos \Psi_1 = 10,8 \text{ Вт}; P_K = \frac{P_y}{\eta_K} = 13,0 \text{ Вт}.$$

Учитывая, что каждый транзистор УМ работает по времени только на половине периода несущей частоты, то наибольшая мощность, выделяемая на переходе К—Э транзистора

$$P = 0,5 \frac{\left[\left(U_{yN} - \frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_{yN} \sin \varphi d\varphi \right) \sqrt{2} \right]^2}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2} \cdot \eta_K} =$$

$$= 0,13 \cdot \frac{U_{yN}^2}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2} \cdot \eta_K} \cos \Psi_1 = 0,155 P_K.$$

В рассматриваемом варианте $P = 2,0 \text{ Вт}$.

Транзисторы выбираются из условия

$$P_{\text{кэ, доп}} \geq 2P = 4,0 \text{ Вт}.$$

В силу того что проектируемый усилитель должен обладать большим коэффициентом усиления по току (максимальный ток на выходе операционного усилителя не превышает $0,005 \text{ А}$), а максимальная амплитуда тока в обмотке управления составляет

$$I_{\text{упр. max}} = \frac{\sqrt{2} U_{yN}}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2}} = 0,35 \text{ А},$$

выберем составной транзистор типа 2Т708А. Его параметры представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Технические параметры транзистора 2Т708А

Тип	$U_{\text{кэ, доп}}, \text{ В}$	$I_K, \text{ А}$	β	$P_{\text{кэ}}, \text{ Вт}$
2Т708А	100	2,5	500	5/1*

* Числитель — $P_{\text{кэ}}$ с теплоотводом; знаменатель — $P_{\text{кэ}}$ без теплоотвода.

Предварительно напряжение питания выбираем из условия $U_0 = 0,5 U_{\text{кэ, доп}}$.

Пусть $U_0 = 50$ В. Проведем предварительную оценку коэффициента трансформации Tr_2 :

$$n_2 = \frac{U_0 \eta_K}{\sqrt{2} U_{yN}} = 0,59 \frac{U_0}{U_{yN}} = 0,49.$$

При реализации усилителя целесообразно подбирать стандартные бронеовые трансформаторы из серий ТА, ТН, или ТАН на 400 Гц, ориентируясь на полученные выше цифры. Эти трансформаторы выпускаются на частоты 50 и 400 Гц. Трансформаторы выпускаются на разные мощности и имеют одну первичную обмотку и разное число вторичных обмоток. Все обмотки характеризуются предельными значениями напряжений и токов. Предельные значения напряжений первичной обмотки могут составлять для разных типов-размеров трансформаторов 40, 115 или 220 В. Для этих напряжений первичных обмоток в справочнике приводятся значения напряжений на вторичных обмотках. При подборе трансформаторов могут меняться ролями первичные и вторичные обмотки, обмотки могут соединяться последовательно, но при этом действующие значения токов и напряжений на них не должно превышать предельных значений для данного трансформатора.

Наиболее подходящим в качестве Tr_2 является трансформатор типа ТА17-115-400. Первая цифра в его марке — это его типоразмер, вторая — напряжение первичной обмотки, третья — частота напряжения. Этот трансформатор имеет семь обмоток, характеристики, которых представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Электрические параметры обмоток трансформатора ТА17-115-400

Номер обмотки	Обмотка и ее выводы	Напряжение, В	Ток, А
1	Первичная (выводы 1—3)	115	0,4
2	Вторичная (выводы 5—6)	28	0,25
3	Вторичная (выводы 7—8)	28	0,25
4	Вторичная (выводы 9—10)	28	0,28
5	Вторичная (выводы 11—12)	28	0,28
6	Вторичная (выводы 13—14)	6	0,28
7	Вторичная (выводы 15—16)	6	0,28

В этом трансформаторе можно использовать все обмотки. Две половины первичной обмотки Tr_2 образуют последовательные соединения обмоток 2—4—6 и 3—5—7, а вторичной обмоткой будет служить обмотка 1. В этом варианте коэффициент трансформации $n_2 = 0,54$. Для такого трансформатора уточненное значение $U_0 = 55$ В.

Амплитуда токов коллектора и базы транзистора:

$$I_{k \max} = \frac{\sqrt{2}U_{yN}}{n_2 \sqrt{R_y^2 + X_y^2}} = 0,65 \text{ A};$$

$$I_{б \max} = \frac{I_{k \max}}{\beta} = 0,0013 \text{ A}.$$

Отметим, что действующее значение тока через одну половину первичной обмотки Tr_2 , составляет 0,23 А, что не превышает предельных значений токов вторичных обмоток данного трансформатора.

Амплитуда входного напряжения транзистора с учетом стандартного значения номинала $R_y = 16 \text{ Ом}$:

$$U_{\text{вх.транз}} = U_{бэ} + I_{k \max} R_y \approx I_{k \max} R_y = 10,4 \text{ В}.$$

Проведем предварительную оценку коэффициента трансформации Tr_1 :

$$n_1 = \frac{\sqrt{2}U_{\text{пу max}} \eta_1}{U_{\text{вх.транз}}} = 0,61.$$

Для реализации Tr_1 выберем трансформатор ТА1-40-400, который имеет также семь обмоток. Электрические параметры его обмоток приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Электрические параметры обмоток трансформатора ТА1-40-400

Номер обмотки	Обмотка и ее выводы	Напряжение, В	Ток, А
1	Первичная (выводы 1—3)	40	0,4
2	Вторичная (выводы 5—6)	28	0,056
3	Вторичная (выводы 7—8)	28	0,056
4	Вторичная (выводы 9—10)	28	0,064
5	Вторичная (выводы 11—12)	28	0,064
6	Вторичная (выводы 13—14)	6	0,064
7	Вторичная (выводы 15—16)	6	0,064

Две половины вторичной обмотки Tr_1 образуют последовательные соединения обмоток 2—4—6 и 3—5—7, а первичной обмоткой будет служить обмотка 1. В этом варианте коэффициент трансформации $n_2 = 0,645$.

Амплитуда тока I_{1m} первичной обмотки трансформатора Tr_1 оценивается по определенному ранее максимальному значению тока базы $I_{б \max}$:

$$I_{1\max} = \frac{I_{6\max}}{n_1} = 0,002 \text{ А.}$$

Входное сопротивление усилителя мощности определяется как

$$R_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{пу max}}}{I_{1\max}} = 3525 \text{ Ом.}$$

Входное сопротивление УМ превышает минимально допускаемое в 2 кОм для нагрузки заданного по ТЗ операционного усилителя, который предполагается использовать в качестве предварительного.

Следует отметить, что построенный макет рассчитанного УМ обычно требует наладки из-за того, что реальные параметры транзисторов, резисторов и трансформаторов допускают известные отклонения от номинальных значений.

3.6. Пример выполнения этапа выбора элементов устройства измерения рассогласования при проектировании угловой следящей системы

В связи с тем что в задании на проектируемую следящую систему рекомендовано использовать для построения измерителя рассогласования (ИУ) сельсины в трансформаторном режиме, то необходимо обосновать выбор класса точности этих сельсинов. Это обоснование базируется на оценке общего коэффициента передачи разомкнутой системы K_p , обеспечивающего заданные показатели точности системы при отработке тестовых входных сигналов с параметрами, приведенными в табл. 1.1. Структурная схема соединения «двигатель — редуктор — нагрузка», показанная на рис. 3.76, содержит в своем составе инерционное и интегрирующее звенья. Эта структурная схема дает основу для представления передаточной функции разомкнутой системы в виде

$$W_p(p) = \frac{K_p}{p(T_m p + 1)},$$

где $K_p = K_{\text{иу}} \cdot K_{\text{пу}} \cdot K_{\text{ум}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot 1/i_p$.

Величина общего коэффициента передачи системы K_p определяет точность системы при отработке типовых входных воздействий системы. Задать тот или иной коэффициент можно изменением коэффициента передачи предварительного усилителя $K_{\text{пу}}$. С учетом структурной схемы соединения «двигатель — редуктор — нагрузка», показанной на рис. 3.76, в проектируемой системе имеется два внешних входных воздействия: управляющее $\varphi_{\text{вх}}$ и возмущающее M_n .

Поскольку проектируемая система является астатической, то при равномерной заводке появляется кинетическая ошибка $\delta_{\text{кин}}$. Кроме того, из-за постоянного момента нагрузки в этом режиме, появляется статическая ошибка $\delta_{\text{ст}}$ в общей ошибке системы, обусловленная этим моментом. Таким образом, в режиме равномерной заводки ошибка системы $\delta_{\text{сист}}$ складывается из четырех составляющих: ошибки измерителя рассогласования $\delta_{\text{иу}}$, люфта редуктора $\delta_{\text{ред}}$, статической ошибки $\delta_{\text{ст}}$ и кинетической ошибки $\delta_{\text{кин}}$. Поскольку в данном примере не проводилась оценка величины люфта редуктора, то мы в дальнейших расчетах учитывать ее не будем. Таким образом, общая ошибка системы в режиме равномерной заводки имеет вид

$$\delta_{\text{сист}} = \delta_{\text{иу}} + \delta_{\text{ст}} + \delta_{\text{кин}}, \quad (3.36)$$

где $\delta_{\text{иу}} = \sqrt{\delta_{\text{сд}}^2 + \delta_{\text{сп}}^2}$; $\delta_{\text{сд}}$ — ошибка сельсина-датчика; $\delta_{\text{сп}}$ — ошибка сельсина-приемника.

Воспользовавшись приемами, излагаемыми в ТАУ, определяем для установившегося режима равномерной заводки

$$\delta_{\text{ст}} = M_{\text{н}} \frac{k_{\text{м}}}{i_{\text{р}}^2 \eta_{\text{р}} K_{\text{р}}}; \quad \delta_{\text{кин}} = \frac{\omega_{\text{нм}}}{K_{\text{р}}}.$$

Подстановка получившихся результатов в формулу (3.36) позволяет найти ограничение снизу на величину общего коэффициента разомкнутой системы:

$$K_{\text{р}} > \frac{M_{\text{н}} k_{\text{м}} + i_{\text{р}}^2 \eta_{\text{р}} \omega_{\text{нм}}}{i_{\text{р}}^2 \eta_{\text{р}} (\delta_{\text{сист}} - \delta_{\text{иу}})}. \quad (3.37)$$

Полученное соотношение (3.37) в зависимости от класса точности сельсинов измерителя рассогласования дает возможность оценить три возможных значения $K_{\text{р}}$.

Если использовать для ИР в проектируемой системе сельсины первого класса, то общий коэффициент разомкнутой системы $K_{\text{р}} > 431$ [1/с]. Для ИР на сельсинах второго класса $K_{\text{р}} > 623$ [1/с] и для сельсинов третьего класса $K_{\text{р}} > 1981$ [1/с].

Динамическая ошибка $\delta_{\text{дин}}(t)$ системы определяется при отработке синусоидального воздействия с параметрами эквивалентной синусоиды $\varphi(t) = A \sin \Omega t$, которые находятся решением системы двух уравнений:

$$\varepsilon_{\text{нм}} = A\Omega^2; \quad \omega_{\text{нм}} = A\Omega.$$

Для проектируемой системы $A = 0,14$ рад; $\Omega = 18,8$ рад/с.

Динамическая ошибка в линейной системе меняется во времени по гармоническому закону с амплитудой $\delta_{\text{дин}}$. Поэтому в расчете

амплитудное значение этой ошибки связано с параметрами эквивалентной синусоиды:

$$\delta_{\text{дин}} \cong \frac{A}{|W_p(j\Omega)|}.$$

Это соотношение определяет положение модуля частотной характеристики на частоте эквивалентной синусоиды Ω :

$$|W_p(j\Omega)| \geq \frac{A}{\delta_{\text{дин}}}. \quad (3.38)$$

Для проектируемой системы $|W_p(j18,8)| \geq 4,0$.

Полученные соотношения (3.37) и (3.38) задают на логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) разомкнутой системы, показанной на рис. 3.77 в виде четырех контрольных точек, причем на частоте $\omega = 1$ [1/с] откладываются три точки, определяемые выражением (3.37), и четвертая точка на частоте $\omega = \Omega = 18,8$ [1/с], определяемая с помощью формулы (3.38). Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутой нескорректированной системы должна проходить обязательно выше четвертой контрольной точки. Для варианта, показанного на рис. 3.77, могут быть выбраны сельсины как первого, так и второго класса точности. Следует отметить, что при выборе K_p всегда стремятся минимизировать его значение, чтобы не расширять полосу пропускания системы, если это не вступает в противоречие с требованием к системе по быстродействию.

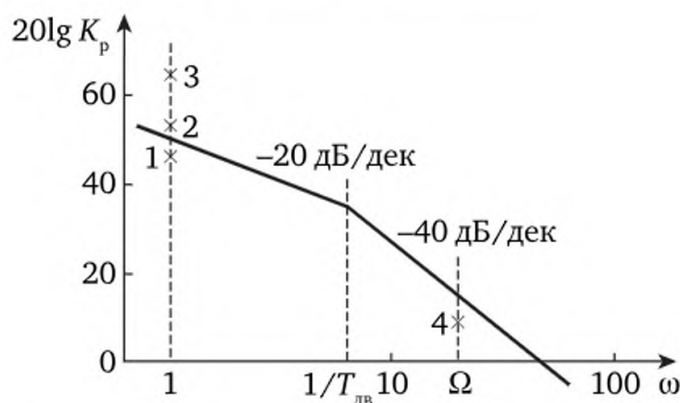


Рис. 3.77. Выбор положения ЛАЧХ разомкнутой системы

Для проектируемой системы ЛАЧХ разомкнутой системы может быть опущена до первой контрольной точки, при этом четвертая контрольная точка окажется под этой характеристикой. Таким образом, для реализации ИР в проектируемой системе целесообразно выбрать сельсины первого класса точности и при этом коэффициент передачи разомкнутой системы $K_p > 431$ [1/с].

3.7. Методика испытаний электрических микромашин

Методика испытаний электрических микромашин для систем управления ориентирована на испытательные (лабораторные) стенды, обобщенная функциональная схема которых представлена на рис. 3.78. Рассмотрим методику испытаний различных электрических машин, ориентируясь на схему рис. 3.78.

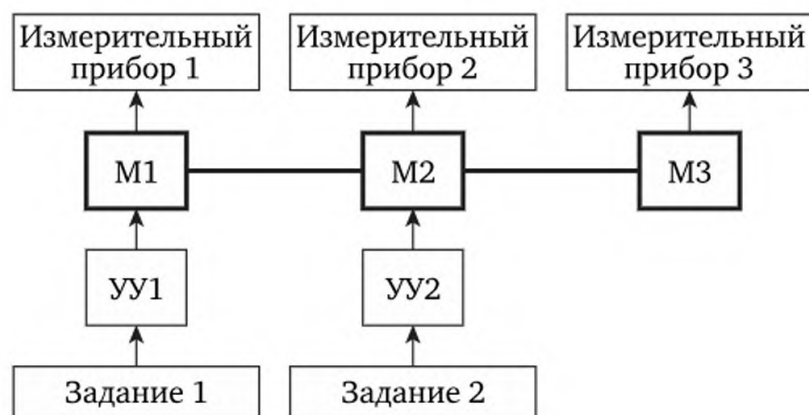


Рис. 3.78. Функциональная схема стенда по испытанию электрических микромашин

Испытание двигателя постоянного тока. Исследуемый двигатель (блок М1) соединен общим валом с нагрузателем (блок М2) и датчиком частоты вращения вала (блок М3). В качестве нагрузателя чаще всего применяется генератор постоянного тока с устройством стабилизации тока через нагрузку генератора (блок УУ2). В качестве датчика частоты вращения М3 обычно используется тахогенератор. В упрощенном варианте стенда вместо УУ2 — обычный реостат. Блоком УУ1 задаются напряжения возбуждения и управления, которые могут регулироваться (блок «Задание 1»). Измерительные приборы 1 и 3 — вольтметры, а прибор 2 — амперметр. При снятии регулировочных характеристик стабилизируют ток нагрузки через генератор (блок «Задание 2») при разных значениях напряжения управления. Это может быть якорное управление либо полюсное. Механические характеристики снимаются при фиксированных значениях напряжений на обмотке возбуждения и якорной обмотке. Результаты измерений сводят в таблицы и по ним определяют параметры математической модели двигателя.

Испытание асинхронного двигателя. Функциональный состав аппаратуры стенда остается тем же, что и при испытании двигателя постоянного тока. Испытуемый двигатель — блок М1. Блок УУ1 — это, в зависимости от конструкции двигателя, либо усилитель переменного тока (для двухфазного асинхронного двигателя), либо частотный преобразователь (для трехфазного двигателя). Блоки М2

и МЗ те же, что и при испытаниях двигателя постоянного тока. Снятие регулировочных и механических характеристик производится по той же методике, что и для двигателя постоянного тока.

Испытание генератора постоянного тока. Схема стенда остается той же, что и при испытаниях двигателя постоянного тока. Блоком УУ1 стабилизируют частоту вращения приводного двигателя М1. Блоком УУ2 регулируют напряжение возбуждения испытуемого генератора (блок М2) и величину нагрузки. В блок «Измерительный прибор 2» в этом случае входят вольтметр и амперметр для контроля тока и напряжения на нагрузке и вольтметр для контроля напряжения на обмотке возбуждения генератора. По результатам измерений строят регулировочные и нагрузочные характеристики генератора.

Тема 4

УСИЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

4.1. Преобразование сигналов в автоматических системах и системах автоматического управления

Усилительно-преобразовательные устройства в структуре одно-контурной системы, показанной на рис. 3.61, предшествуют силовым блокам усилителей мощности и служат для согласования, усиления и коррекции сигналов датчиков обратных связей и измерителя рассогласования. В составе этих устройств могут использоваться преобразователи сигналов (чаще всего это демодуляторы и модуляторы), предварительные усилители переменного и постоянного тока, дискретные логические элементы, корректирующие устройства как простейшие на пассивных элементах или операционных усилителях, так и многофункциональные в составе микропроцессорных регуляторов.

Наиболее часто встречающиеся формы сигналов в автоматических системах:

- 1) *аналоговые сигналы* (будем так называть медленно меняющиеся, непрерывные сигналы);
- 2) *модулированные сигналы* со следующими видами модуляций:
 - амплитудная модуляция (АМ),
 - частотная модуляция (ЧМ),
 - фазовая модуляция (ФМ),
 - амплитудно-импульсная модуляция (АИМ),
 - широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
- 3) *цифровые сигналы*.

В частности, в следящих системах широкое распространение получили преобразователи, преобразующие аналоговые (относительно медленно меняющиеся) сигналы в амплитудно-модулированные и наоборот.

Смысл любого вида модуляции связан, прежде всего, с преобразованием низкочастотного спектра входного аналогового сигнала в более высокочастотный спектр модулированного. Такое преобразование облегчает реализацию электронных блоков предварительного усиления и выработки управляющих сигналов для силовых блоков усилителей мощности. Обратное преобразование модулированного сигнала в аналоговый также часто встречается. Например, в случае использования корректирующих цепей на пассивных элементах, рассчитанных на работу с аналоговым сигналом, формирования управляющих сигналов двигателей постоянного тока.

Виды модуляций АМ, ЧМ и ФМ связаны с использованием, так называемого, опорного сигнала или сигнала «несущей частоты» синусоидальной формы $A_m \sin(\omega t + \varphi_0)$, показанного на рис. 4.1.

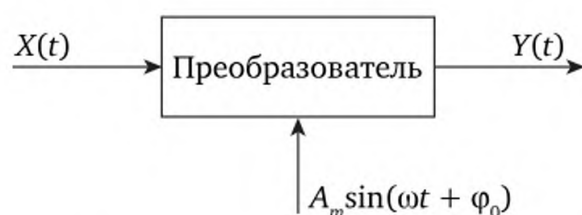


Рис. 4.1. Преобразователь с опорным сигналом

Осуществляя пропорциональную зависимость амплитуды A_m от входного аналогового сигнала $X(t)$, можно получить АМ-сигнал на выходе преобразователя (модулятора). Аналогично, осуществляя пропорциональную зависимость частоты ω опорного сигнала или начальной фазы φ_0 от входного сигнала $X(t)$, получаем ЧМ- или ФМ-сигналы на выходе соответствующих модуляторов. АМ-сигналами являются выходные сигналы с трансформаторных измерителей рассогласования, рассматриваемые в теме 3. Также управляющим сигналом для двухфазных асинхронных двигателей является АМ-сигнал.

Амплитудно-импульсная и широтно-импульсная модуляции в своей основе подразумевают выработку импульсов фиксированной частоты (фиксированного периода T следования импульсов) на выходе модулятора. При этом амплитуда импульсов должна быть пропорциональна входному аналоговому сигналу в момент появления импульса, а их длительность τ постоянной (для АИМ-модуляции) или длительность импульса τ должна быть пропорциональна входному аналоговому сигналу $X(t)$ в момент появления импульса, а амплитуда импульсов — постоянной (для ШИМ-модуляции). Эти виды сигналов показаны на рис. 4.2, а и б соответственно.

Цифровая форма сигнала соответствует АИМ-сигналу при длительности импульсов, равной периоду их следования $\tau = T$, а амплитуда импульсов должна быть пропорциональна входному аналого-

му сигналу в момент появления импульса, но квантуется по уровню в соответствии с реализуемой разрядностью представления аналогового сигнала в данном модуляторе.

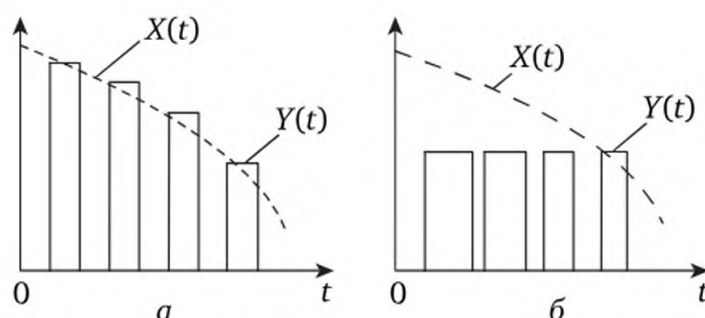


Рис. 4.2. Виды модуляций:
а — АИМ; б — ШИМ

4.2. Демодуляторы и модуляторы

Демодуляторы и модуляторы являются преобразовательными устройства и служат для преобразования АМ-сигнала в аналоговую форму (демодуляторы) и аналоговые сигналы в АМ-форму (модуляторы). По своей конструкции эти устройства обратимы, т. е., меняя местами вход и выход такого устройства, можно из демодулятора получить модулятор и наоборот.

Конструктивно работа этих преобразователей базируется на использовании быстродействующих переключающих устройств. В качестве таких устройств применяют механические реле (обычно поляризованные), диодные схемы или схемы с транзисторами в ключевых режимах. По принципу исполнения демодуляторы и модуляторы выполняют однополупериодными либо двухполупериодными.

4.2.1. Однополупериодный демодулятор на поляризованном реле

Рассмотрим принцип работы однополупериодного демодулятора на базе поляризованного механического реле. Схема преобразователя показана на рис. 4.3.

Входное модулированное по амплитуде напряжение поступает на первичную обмотку трансформатора Tr . Снимаемое со вторичной обмотки трансформатора напряжение периодически поступает на выход демодулятора в соответствии с полярностью поступающего на обмотку поляризованного реле сетевого напряжения. Поляризованное реле имеет группу из трех контактов. Подвижный средний контакт 1 замыкается с одним из крайних неподвижных (2 или 3) в зависимости от полярности, поступающего на обмотку реле, сете-

вого напряжения. В демодуляторе используется только один неподвижный контакт 2, который замыкается только при одной полярности сетевого напряжения на обмотке реле. На рис. 4.4 показаны формы сигналов на входах и выходе демодулятора.

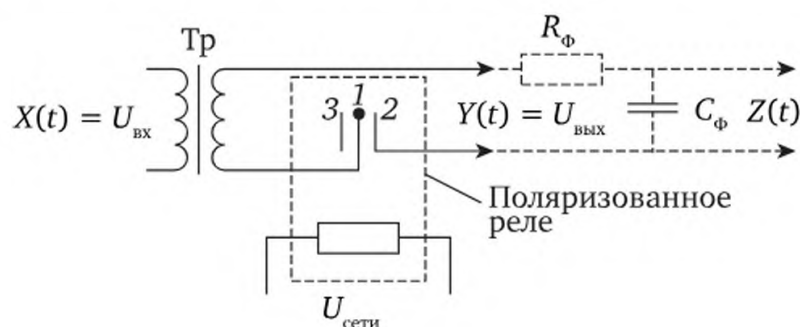


Рис. 4.3. Схема однополупериодного демодулятора

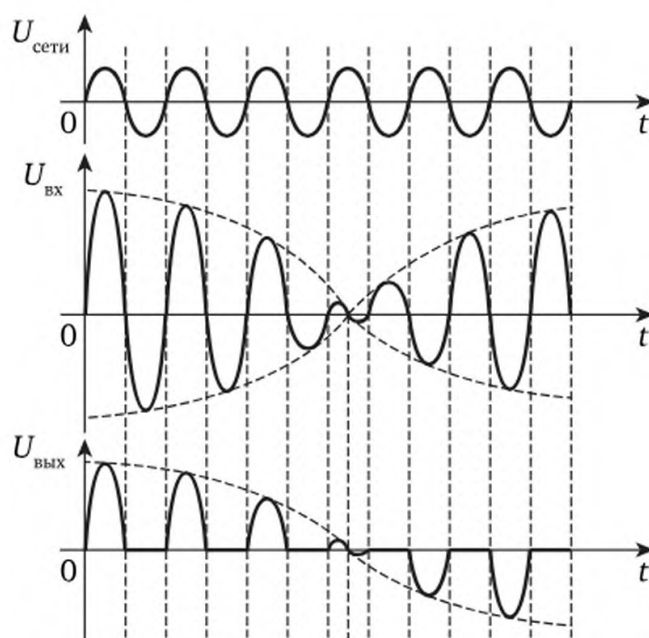


Рис. 4.4. Формы сигналов на входах и выходе демодулятора

Отметим, что полярность выходного сигнала зависит от соотношения фаз входного и сетевого сигналов. Например, в случае, показанном на рис. 4.4, совпадение фаз сетевого и входного сигналов приводит к появлению на выходе демодулятора положительных полупериодов входного сигнала. В случае же, когда фазы сетевого и входного сигналов сдвинуты на 180° по отношению друг к другу, на выходе демодулятора появляются отрицательные полупериоды входного сигнала. Именно поэтому демодуляторы иногда называют *фазочувствительными выпрямителями* (ФЧВ).

Уровень пульсаций выходного сигнала демодулятора достаточно высок, и для их сглаживания применяют низкочастотный фильтр,

показанный на рис. 4.3 пунктиром. Этот фильтр является пассивным апериодическим (инерционным) звеном. Как правило, роль резистора с сопротивлением R_{ϑ} выполняет внутреннее активное сопротивление источника входного сигнала демодулятора, приведенное к выходной обмотке трансформатора Tr , а величина емкости конденсатора C_{ϑ} выбирается. Этот выбор зависит от постоянной времени такого фильтра, которая определяется как $T_{\vartheta} = R_{\vartheta} C_{\vartheta}$. Чем больше эта постоянная, тем эффективнее сглаживаются пульсации.

Оценим коэффициент передачи такого демодулятора при единичном коэффициенте передачи входного трансформатора. Пусть амплитуда входного модулированного по амплитуде сигнала фиксирована. Тогда

$$U_{вх} = U_{\max} \sin(\omega t).$$

Форма выходного сигнала демодулятора в этом случае показана на рис. 4.5, а. Этот сигнал может быть представлен в виде суммы двух составляющих: постоянной составляющей Y_0 и переменной (пульсирующей) составляющей $Y_1(t)$, показанных соответственно на рис. 4.5, б и в.

Оценивая среднее значение выходного сигнала на одном периоде и далее, беря отношение среднего значения выходного сигнала к амплитуде входного АМ-сигнала, получаем коэффициент передачи однополупериодного демодулятора:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} U_m;$$

$$K_{\text{дм}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{\pi} \frac{U_{\max}}{U_{\max}} = 0,31.$$

Разложение в ряд Фурье переменной составляющей $Y_1(t)$, показанной на рис. 4.5, в, на периоде T дает значение амплитуды основной (первой) гармоники $Y_1 = \frac{U_m}{2}$.

Частота этой гармоники совпадает с несущей частотой. Все гармоники с более высокими номерами имеют убывающие амплитуды. Степень убывания напрямую зависит от величины номера гармоники. Кроме того, чем выше номер гармоники в разложении переменной составляющей $Y_1(t)$ на выходе демодулятора, тем больше она будет ослабляться фильтром в виде инерционного звена. Следовательно, необходимо стараться как можно сильнее сгладить основную (первую) гармонику. Все другие гармоники с более высокими номерами будут ослабляться в более значительной степени.

Возвращаясь к постоянной времени фильтра на выходе демодулятора, следует помнить, что этот фильтр повышает порядок характеристического уравнения разомкнутой системы и может привести

к ухудшению качества работы замкнутой системы и даже к потере ею устойчивости при чрезмерном увеличении T_{Φ} . На практике стремятся, чтобы при выборе постоянной времени фильтра выполнялось неравенство

$$T_{\Phi} \leq \frac{0,1}{\omega_{\text{ср}}},$$

где $\omega_{\text{ср}}$ — частота среза разомкнутой системы.

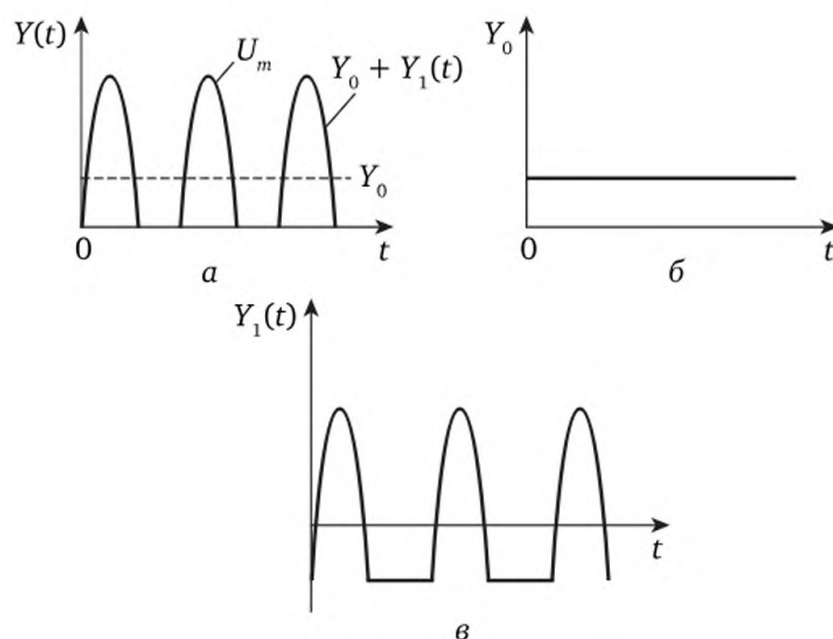


Рис. 4.5. Форма выходного сигнала демодулятора при фиксированной амплитуде АМ-сигнала на входе (а), постоянная составляющая (б) и переменная составляющая (в) выходного сигнала

Последнее неравенство гарантирует дополнительный фазовый сдвиг на частоте среза разомкнутой системы не превышающий -5° .

Основными недостатками демодуляторов и модуляторов на механических реле являются их относительно низкая надежность и ограниченная частота срабатывания, не превышающая 1 кГц. С целью устранения указанных недостатков подобные преобразователи строят с применением полупроводниковых диодов, либо с использованием транзисторов в ключевых режимах. Схемы на диодах менее распространены, так как требуют тщательного подбора диодов и балластных резисторов для балансировки схем в отсутствие входного сигнала. В силу этих причин мы на них останавливаться не будем. При необходимости можно обратиться к соответствующей литературе.

Далее рассмотрим однополупериодный демодулятор на транзисторах в ключевых режимах.

4.2.2. Однополупериодный демодулятор на транзисторах в ключевых режимах

Если вместо поляризованного реле поставить транзистор в ключевом режиме, управляемый сетевым напряжением, то можно повысить несущую частоту и надежность работы преобразователя. Однако подобное реле на базе одного транзистора обладает неудовлетворительными свойствами в закрытом состоянии из-за относительно большого тока $I_{к0}$. Иными словами, подобное реле как бы недостаточно полностью закрывается. Существенно снизить величину $I_{к0}$ (на 3—4 порядка) удастся встречным включением двух одинаковых транзисторов. В этом случае при закрытом состоянии транзисторов токи $I_{к0}$ направлены навстречу друг другу, и происходит их взаимная компенсация. На практике имеется даже специальная микросхема, применяемая в радиотехнике в качестве детектора. Схема демодулятора с использованием двух встречно включенных транзисторов в ключевых режимах имеет вид, показанный на рис. 4.6.

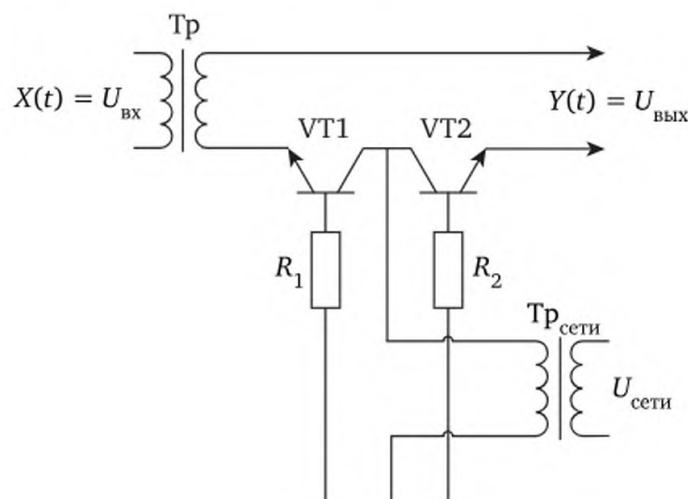


Рис. 4.6. Однополупериодный демодулятор на транзисторах

В схеме рис. 4.6 через сетевой трансформатор осуществляется одновременное открывание и закрывание встречно включенных транзисторов обычно по схеме с общим коллектором. Формы сигналов в разных точках схемы такого демодулятора, а также вопросы выбора параметров сглаживающего фильтра остаются теми же, что были рассмотрены выше для демодулятора на механическом реле.

4.2.3. Однополупериодные транзисторные модуляторы

Как отмечалось выше, модулятор строится по той же схеме, что и демодулятор, но меняются местами вход и выход этих преобразователей. Схема однополупериодного модулятора на транзисторах в ключевых режимах представлена на рис. 4.7. Все обозначения сигналов сохраняются теми же, что и для демодулятора. Однако здесь

на вход модулятора поступает аналоговый сигнал, а снимается с выхода АМ-сигнал.

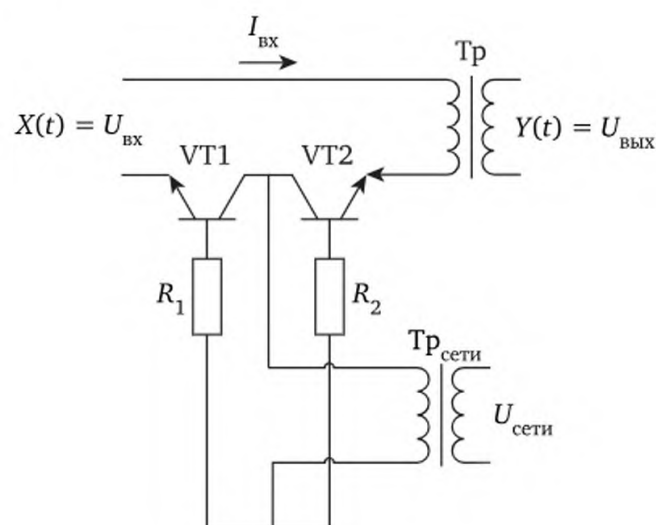


Рис. 4.7. Однополупериодный модулятор на транзисторах

Пояснение принципа его работы удобно сделать с помощью сопоставлений изменения входного тока и напряжений в разных точках схемы, изображенных на рис. 4.8.

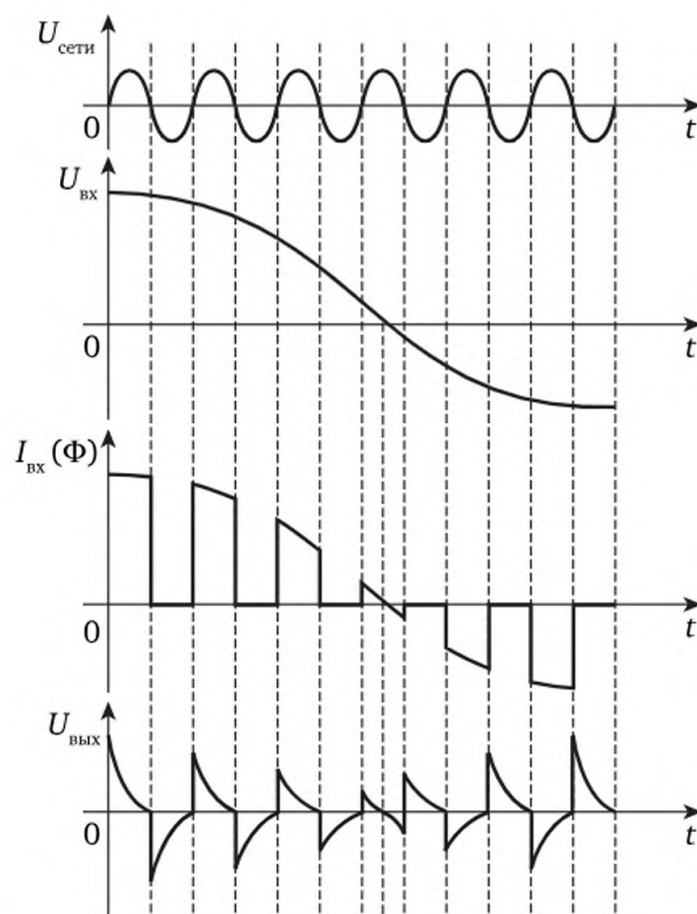


Рис. 4.8. Формы тока и напряжений в схеме однополупериодного модулятора

На этом рисунке показано, что в соответствии с фазой управляющего сетевого напряжения происходит открытие и закрывание транзисторов, через которые пропускается или нет ток на первичную обмотку трансформатора. В соответствии с изменением этого тока в сердечнике трансформатора создается переменный магнитный поток. Этот поток в свою очередь наводит ЭДС индукции во вторичной обмотке трансформатора. Данная ЭДС и будет являться выходным сигналом модулятора.

Следует отметить, что представленные процессы на рис. 4.7 в незначительной степени упрощены. Так, в теме 3 отмечалось, что токи через активно-индуктивную нагрузку не могут меняться скачком и для защиты транзисторов при их закрытии используют шунтирующие диоды. В схемах модуляторов обычно этого не делают при достаточно большом входном сопротивлении нагрузки, на которую работает сам модулятор, т. е. входной ток первичной обмотки трансформатора относительно невелик. Поэтому на рисунке использовалось упрощенное представление входного тока.

Отметим, что форма выходного сигнала модулятора отличается от синусоидальной на каждом отдельно взятом отрезке времени длиной в половину периода. Вместе с тем подобный сигнал является АМ-сигналом.

4.2.4. Двухполупериодные демодуляторы и модуляторы

Недостатком однополупериодного демодулятора является его относительно невысокий коэффициент передачи и частота пульсаций, совпадающая с несущей частотой. При таком преобразовании теряется большая часть входного АМ-сигнала. Избежать этого удастся в схеме двухполупериодного демодулятора за счет усложнения схемы преобразователя. Фактически используется параллельное включение двух однополупериодных демодуляторов с одним общим входным трансформатором с двумя одинаковыми вторичными обмотками и общим сетевым трансформатором, а также с двумя одинаковыми вторичными обмотками. Вторичные обмотки входного трансформатора подключаются к демодуляторам согласно (в фазе), а вторичные обмотки сетевого трансформатора управляют транзисторами в противофазе. Выходные сигналы демодуляторов суммируются чаще всего с использованием операционного усилителя.

Таким образом, коэффициент передачи двухполупериодного демодулятора увеличивается в 2 раза по сравнению с однополупериодным. Частота пульсаций также возрастает в 2 раза, что увеличивает степень сглаживания пульсаций на выходе демодулятора при тех же ограничениях на выбор постоянной времени сглаживающего фильтра.

Двухполупериодный модулятор делается по той же схеме, что и аналогичный демодулятор. Вместе с тем следует отметить, что

в практике построения систем автоматического управления однополупериодные преобразователи нашли большее распространение, так как схемная реализации их значительно проще по сравнению с двухполупериодными. Кроме того, однополупериодные демодуляторы во многих случаях могут строиться вообще без использования входного трансформатора.

4.3. Аналоговая и цифровая электроника

Электроника систем управления за десятилетия своего развития прошла большой путь от ламповой и транзисторной навесной техники до применения интегральных схем. Это развитие привело к унификации источников питания и требований к входным и выходным параметрам преобразователей сигналов, что облегчает их стыковку и согласование их функционирования. Сюда относятся диапазоны изменения входных и выходных напряжений и токов, а также входные и выходные сопротивления. Подобная унификация затрагивает как аналоговую технику, так и дискретную логическую, поскольку во многих практических случаях элементы такой техники тесно взаимодействуют друг с другом в рамках одной системы управления.

Ниже мы дадим основные сведения по операционным усилителям, нашедшим наибольшее распространение для усиления как аналоговых, так и АМ-сигналов. На подобных усилителях строят различные корректирующие фильтры с определенными передаточными функциями. Помимо этого, далее речь пойдет об основных логических схемах, составляющих основу большой номенклатуры сложных дискретных элементов, используемых в системах управления.

4.3.1. Операционные усилители

Основу операционного усилителя составляет дифференциальный усилитель постоянного тока с большим коэффициентом передачи, охваченный глубокой отрицательной обратной связью через комплексное сопротивление Z_0 , и двумя входами, на которые поступают входные сигналы. Общий вид операционного усилителя показан на рис. 4.9. Входной сигнал X_1 поступает на первый, инвертирующий вход усилителя, отмеченный на схеме кружком, через комплексное сопротивление Z_1 . Инвертирующий вход усиливает и передает сигнал на выход Z с изменением полярности. Второй вход — неинвертирующий.

Питание операционного усилителя осуществляется от двух стабилизированных источников постоянного напряжения E разной полярности.

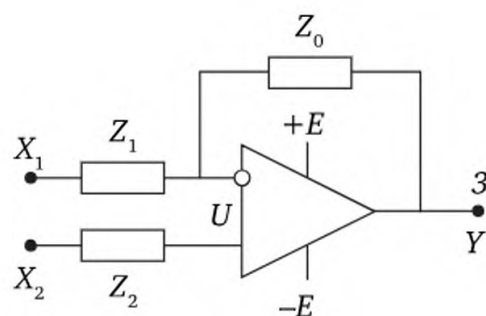


Рис. 4.9. Общий вид схемы операционного усилителя

В качестве примера приведем основные параметры распространенного операционного усилителя первых отечественных разработок К140УД7 (более позднее название — КТ140УД708):

- напряжение питания (номинальное) ± 15 В;
- коэффициент усиления 30 000;
- ток нагрузки — не более 1,8 мА;
- сопротивление нагрузки — не менее 2 кОм;
- входное сопротивление — не менее 0,4 мОм;
- полоса пропускания — до 1 МГц.

Наличие большого коэффициента передачи K самого усилителя, относительно высокого входного сопротивления и малого выходного сопротивления позволяет просто реализовать требуемую передаточную функцию операционного усилителя путем подбора пассивных элементов Z_1 в прямой и Z_0 в обратной связи.

Обратная связь операционного усилителя через Z_0 действует параллельно с входным сигналом и приводит к складыванию токов, порождаемых источниками входного и выходного сигналов. Каждый ток, используя принцип суперпозиции, можно оценивать отдельно. Пусть неинвертирующий вход рассматриваемого усилителя будет заземлен, т. е. $X_2 = 0$. Ток от входного источника X_1 оценивается при закороченных и заземленных выходных выводах усилителя как

$$i_{X_1} = \frac{\dot{X}_1}{Z_0 + Z_1},$$

а составляющая напряжения на входе усилителя —

$$\dot{U}_{X_1} = \frac{\dot{X}_1 Z_0}{Z_0 + Z_1}.$$

Аналогично ток от источника Y оценивается при закороченном источнике X_1 как

$$i_Y = \frac{\dot{Y}}{Z_0 + Z_1},$$

а составляющая напряжения на входе усилителя —

$$\dot{U}_Y = \frac{\dot{Y}Z_1}{Z_0 + Z_1}.$$

Используя полученные выше соотношения, получаем оценку входного напряжения усилителя:

$$\dot{U} = \dot{U}_{X_1} + \dot{U}_Y = \frac{\dot{Y}}{K} = \frac{\dot{X}_1 Z_0 + \dot{Y} Z_1}{Z_0 + Z_1}.$$

Комплексный коэффициент усиления операционного усилителя по первому входу с учетом того, что $K \gg 1$, будет:

$$\frac{\dot{Y}}{\dot{X}_1} = \frac{K}{1-K} \frac{Z_0}{Z_1 + \frac{Z_0}{1-K}} \approx -\frac{Z_0}{Z_1}. \quad (4.1)$$

В общем виде изображение сигнала $Y(p)$ на выходе такого усилителя, если используются оба входа, на которые поступают входные сигналы X_1 и X_2 , определяется как

$$Y(p) = \frac{Z_0(p)}{Z_2(p)} X_2(p) - \frac{Z_0(p)}{Z_1(p)} X_1(p).$$

Приведенные данные по этому типу операционного усилителя показывают возможность простой стыковки таких усилителей друг с другом, достаточно большое входное сопротивление и широкую полосу пропускания для передачи и корректировки рабочих сигналов систем управления. Параметры операционных усилителей более поздних отечественных и зарубежных разработок обладают еще более высокими количественными показателями.

На базе операционного усилителя удобно строить суммирующие усилители и усилители с корректировкой пропускаемого сигнала путем реализации требуемой передаточной функции операционного усилителя. Обычно для этого используются инвертирующий вход и определенные комплексные сопротивления на входе и в обратной связи. На основании выражения (4.1) передаточная функция такого усилителя имеет вид

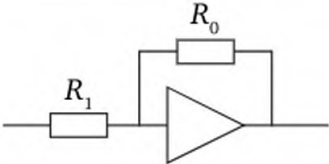
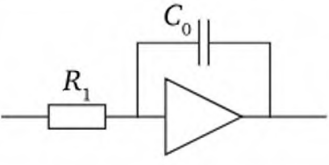
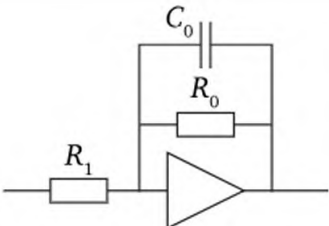
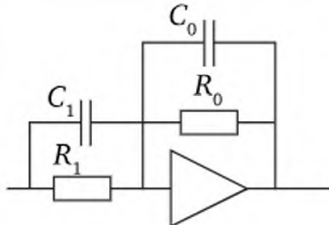
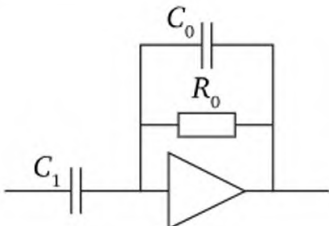
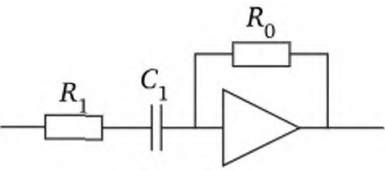
$$W(p) = -\frac{Z_0(p)}{Z_1(p)}. \quad (4.2)$$

Наиболее распространенные схемы на операционных усилителях и соответствующие им передаточные функции показаны в табл. 4.1. В представленной таблице не приводится схема дифференцирующих усилителей без R_0 в первой схеме и без R_1 во второй, кото-

рые встречаются в отдельных изданиях. Это объясняется тем, что применение подобных дифференциаторов на практике приводит большому усилению высокочастотных помех в сигнале управления, которые приходится ослаблять постановкой дополнительных инерционных усилителей (фильтров).

Таблица 4.1

Наиболее распространенные схемы на операционных усилителях

Номер схемы	Схема	Передаточная функция
1		Пропорциональный усилитель $W(p) = K; K = \frac{R_0}{R_1}$
2		Интегратор $W(p) = \frac{K}{p}; K = \frac{1}{C_0 R_1}$
3		Инерционный усилитель $W(p) = \frac{K}{T_0 p + 1}; K = \frac{R_0}{R_1}; T_0 = C_0 R_0$
4		Интегро-дифференцирующий усилитель $W(p) = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_0 p + 1}; K = \frac{R_0}{R_1}; T_1 = C_1 R_1;$ $T_0 = C_0 R_0$
5		Дифференцирующий усилитель 1 $W(p) = \frac{Kp}{T_0 p + 1}; K = C_1 R_0; T_0 = C_0 R_0$
6		Дифференцирующий усилитель 2 $W(p) = \frac{Kp}{T_0 p + 1}; K = C_1 R_0; T_0 = C_1 R_1$

4.3.2. Цифровая электроника

Дискретные и цифровые виды сигналов, о которых шла речь в п. 4.1, находят широкое распространение в системах автоматизации и САУ. В первую очередь речь идет о верхних уровнях управления систем автоматизации и SCADA-систем, которые в общем виде рассмотрены в теме 1. Кроме того, САУ нижнего уровня, управляемые по каналам связи от задающих микропроцессорных устройств верхнего уровня, также относятся к разряду цифровых систем, поскольку в них присутствует преобразование сигналов из дискретной формы в аналоговую и обратно.

Также в структурах САУ часто используются микропроцессорные регуляторы, осуществляющие реализацию дискретных управляющих ПИД алгоритмов (пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы). В практике построения САУ встречаются самонастраивающиеся и адаптивные регуляторы на базе микропроцессоров. Все устройства дискретной техники в основе своей содержат ряд базовых элементов, к которым можно отнести:

- электронные ключи и на их основе мультиплексоры и демультиплексоры;
- основные логические элементы: схемы НЕ, ИЛИ, И;
- компараторы;
- триггеры и на их основе счетчики, элементы памяти.

Вопросы, связанные с особенностями организации памяти в микропроцессорных устройствах управления, управлением мультиплексорами и демультиплексорами, аналого-цифровыми (АЦП) и цифроаналоговыми (ЦАП) преобразователями рассматриваются в теме 5. Здесь же кратко рассматриваются первые три вида базовых элементов и анализируется в качестве примера схема управления силовым блоком ШИМ, содержащая как аналоговые, так и дискретные элементы в одном устройстве.

Электронные ключи чаще всего реализуются на транзисторах в ключевом режиме. Схема простейшего варианта подобного ключа показана на рис. 4.10, а. Подаваемые на базу транзистора прямоугольные импульсы отрицательной полярности (для *p-n-p*-транзистора (см. рис. 4.10, а)) переводят транзисторный ключ из закрытого состояния в открытое. Если отрицательному значению входного импульса соответствовала логическая единица, то такой логической единицей этого ключа будет наличие коллекторного тока открытого транзистора. Высокому потенциалу на базе транзистора (логический ноль) соответствует отсутствие (точнее, малая величина) коллекторного тока через закрытый транзистор.

Кроме такого простого ключа распространение находят ключи на базе оптопар (оптронов). Схема такого ключа показана на рис. 4.10, б. Здесь в одном корпусе располагаются светодиод и фототранзистор, который открывается световым потоком при

прохождении тока через светодиод. Вместе с резисторами и источником напряжения E , показанными на рисунке, оптрон формирует напряжение управления U_y в базовой управляющей цепи силового транзистора. Такое управление силовыми транзисторами реализуется, например, в силовом блоке, показанном на рис. 3.25.

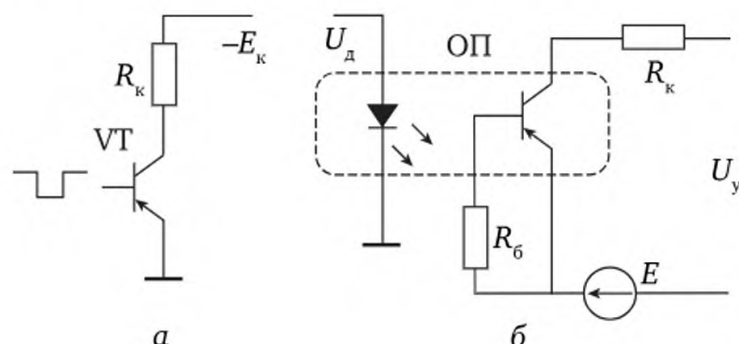


Рис. 4.10. Электронные ключи:

a — транзистор в ключевом режиме; $б$ — оптопара (оптрон)

Достоинством электронных ключей на основе оптопар является отсутствие гальванической связи между схемой, формирующей дискретные сигналы управления ключами, и силовыми схемами, что повышает надежность работы таких устройств.

Адресное подключение разных входных линий к одной выходной осуществляет мультиплексор, который строится на базе электронных ключей. Обратную задачу решает демультиплексор.

Основные логические элементы и компаратор составляют основу структурных построений большинства интегральных схем и блоков цифровой техники. К ним относятся схемы НЕ, ИЛИ и И. Их схематичное изображение представлено соответственно на рис. 4.11, a , $б$ и $в$.

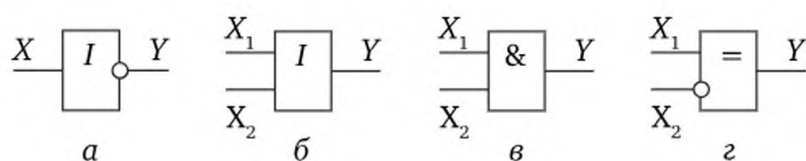


Рис. 4.11. Основные логические элементы:

a — схема НЕ; $б$ — схема ИЛИ; $в$ — схема И; $г$ — компаратор

В табл. 4.2 представлены таблицы соответствий состояний входов и выходов для таких элементов.

Отметим в качестве примера, что показанный на рис. 4.10, a транзисторный ключ может быть использован как логический блок НЕ, если в качестве выходного сигнала рассматривать изменение напряжения на его коллекторе. В практике построения автоматизированных систем широко применяют интегральные микросхемы серии K155 и более поздние ее модификации, в которых реализу-

ются порядка 50 микросхем базовых элементов с различными параметрами.

Таблица 4.2

Таблицы состояний основных логических элементов

НЕ		ИЛИ			И		
X	Y	X ₁	X ₂	Y	X ₁	X ₂	Y
0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0
		1	0	1	1	0	
		1	1	1	1	1	1

Компараторы — это элементы, меняющие свое состояние с «1» на «0» и обратно в зависимости от соотношений величин абсолютных значений входных сигналов, поступающих на их инвертирующий и неинвертирующий входы. Схематично компаратор изображен на рис. 4.10, з. Его основу составляет операционный усилитель без введения отрицательной обратной связи. Для его функционирования достаточно однополярного источника питания. Состояние компаратора (логический «0» или логическая «1») будет зависеть от знака разности входных сигналов.

В качестве примера рассмотрим схему управления силовым блоком ШИМ. Работа силового блока рассматривается в п. 3.2.2.5. Схема силового блока представлена на рис. 3.24. Схема управления предназначена для формирования напряжений управления в базовых цепях силовых транзисторов U_{y1} , U_{y2} , U_{y3} , U_{y4} силового блока. Функциональная схема управления для силового блока ШИМ показана на рис. 4.12.

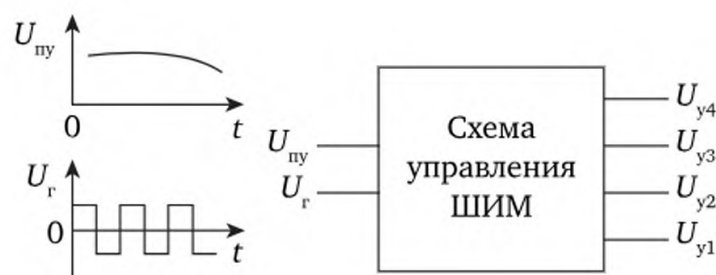


Рис. 4.12. Функциональная схема управления для силового блока ШИМ, показанного на рис. 3.25

Принципиальная схема управления силовым блоком ШИМ представлена на рис. 4.13. Временные диаграммы сигналов блока управления для силового блока ШИМ, поясняющие логику работы принципиальной схемы управления, показаны на рис. 4.14.

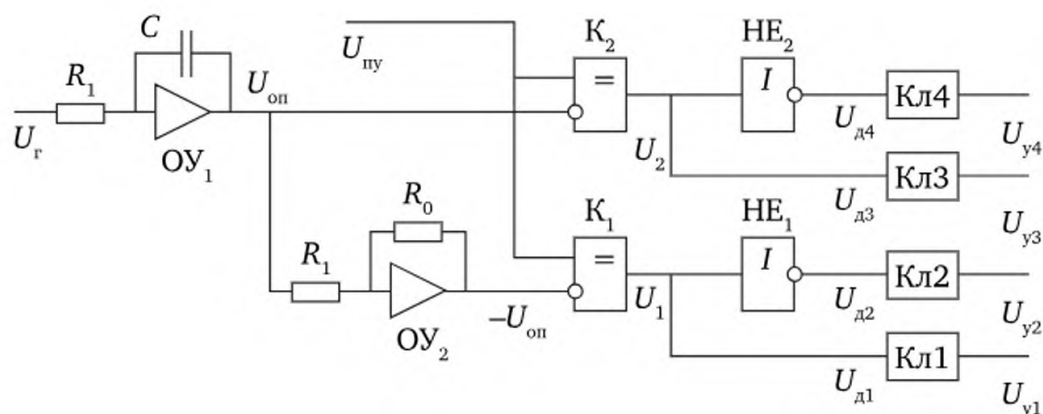


Рис. 4.13. Принципиальная схема блока управления для силового блока ШИМ

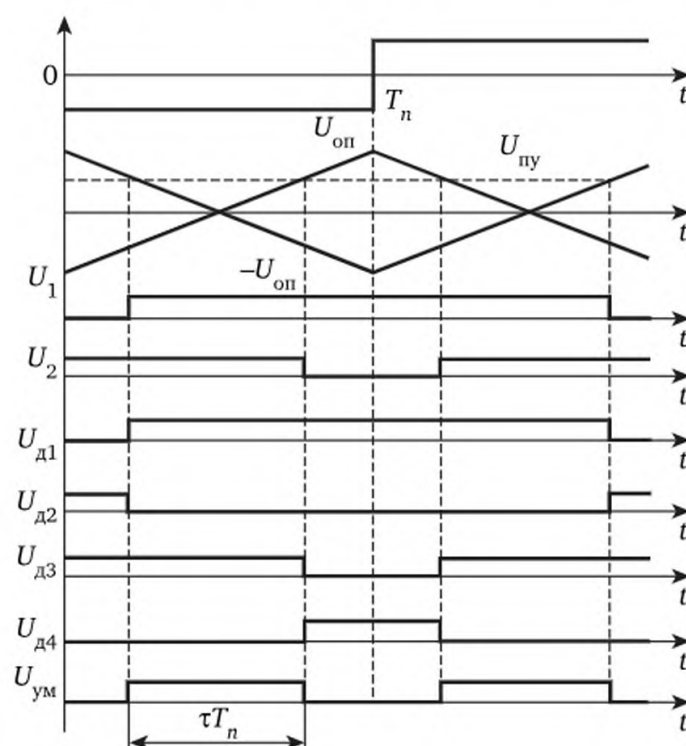


Рис. 4.14. Временные диаграммы сигналов блока управления для силового блока ШИМ

Блок управления работает по вертикальному принципу. Внешний мультивибратор (генератор) вырабатывает напряжение U_r в форме меандра фиксированной частоты $f_0 = \frac{1}{T_n}$ Гц. Это напряжение подается на вход интегрирующего усилителя OY_1 . опорное напряжение пилообразной формы $U_{оп}$ на выходе интегратора подается на инвертирующий вход компаратора K_2 . Инвертированное (через операционный усилитель OY_2) опорное напряжение $-U_{оп}$ подается на инвертирующий вход компаратора K_1 . опорные напряжения на компараторах сравниваются с аналоговым входным сигналом $U_{пу}$, поступающим от предварительного усилителя.

На диаграммах рис. 4.14 сигнал $U_{пу}$ представлен фиксированным уровнем, так как в силу высокой частоты следования импульсов задающего генератора, на периоде T его работы предполагается, что изменением входного сигнала можно пренебречь. Компараторы на схеме дают логическую «1» при условии $U_{пу} > U_{оп}$ для K_2 и $U_{пу} > -U_{оп}$ для K_1 . Выходные сигналы компараторов U_1 и U_2 , а также схемы НЕ формируют сигналы управления светодиодами оптопар $U_{д1} \div U_{д4}$, которые на схеме обозначены как электронные ключи Кл1—Кл4.

Напряжения управления $U_{y1}—U_{y4}$, подводимые к транзисторам моста, повторяют в определенном масштабе форму импульсов на светодиодах $U_{д1}—U_{д4}$ и соответствуют состояниям проводимости транзисторных ключей моста.

На нижнем графике рис. 4.14 показаны результирующие импульсы напряжения на нагрузке силового моста рис. 3.24. Ширина этих импульсов пропорциональна величине входного сигнала, а частота в 2 раза превышает частоту работы задающего генератора.

4.4. Микропроцессорные регуляторы автоматических систем и систем автоматического управления

Развитие цифровой электроники, создание ЭВМ, способных решать задачи управления в «реальном времени», разнообразие надежных способов передачи данных — все это послужило основой к применению микропроцессорных средств в САУ. Сейчас уже сложно представить технологическое производство без применения микропроцессорных средств сбора, анализа, передачи данных и выработки управляющих сигналов. Применение микропроцессорных средств породило новые типы СА и САУ, в которых сравнением входных и выходных сигналов и выработкой управляющего воздействия занимается одно устройство — программируемый контроллер. Такие устройства обладают модульной структурой, которая позволяет:

- обрабатывать информацию с датчиков, сравнивать ее с уставкой, задаваемой внешним устройством или запрограммированной в самом контроллере;
- вырабатывать, согласно запрограммированным законам регулирования, управляющее воздействие на объект управления;
- передавать данные другим контроллерам.

На данный момент можно выделить три типа микропроцессорных устройств, применяемых в задачах управления и автоматизации:

- 1) промышленные компьютеры (ЭВМ);
- 2) промышленные контроллеры (ПК);
- 3) программируемые логические контроллеры (ПЛК).

Промышленные компьютеры по своему наполнению полностью схожи со стандартными IBM-совместимыми компьютерами.

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) — микропроцессорные системы, ориентированные для реализации алгоритмов логического управления, имеют модульную структуру — процессорный модуль, модуль ввода/вывода, модуль связи.

Промышленные контроллеры (ПК) — микропроцессорные системы, ориентированные на локальное управление объектом. Так же как и ПЛК, промышленные контроллеры имеют модульную структуру.

Промышленные контроллеры можно разделить на три категории: промышленные контроллеры общего назначения (универсальные средства промышленной автоматики), проблемно ориентированные средства автоматики и встраиваемые в системы автоматики. Последние интегрированы с объектом управления, например, являются управляющей частью станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Первые две категории конструктивно выполняются в отдельных, закрытых корпусах, имеющих устройство формирования управляющих воздействий на объект управления (устройство сопряжения с объектом — УСО).

Проблемно ориентированные промышленные контроллеры предназначены для работы в составе СА и САУ определенными видами выходных параметров управляемого объекта, например: управление частотой вращения синхронного генератора, управление угловым положением некоторого объекта, управление температурой внутри нагревательной печи и т. п. Поэтому ПК в своем составе имеют различные специфические устройства сопряжения с объектом, которые преобразуют управляющий сигнал, вырабатываемый контроллером, в сигнал, непосредственно управляющий объектом.

Примером эффективного использования проблемно ориентированных ПК могут служить микропроцессорные системы в составе замкнутых частотно-управляемых электроприводов с синхронными и асинхронными исполнительными двигателями. Долгое время в системах управления движением применялись в основном двигатели постоянного тока. Это было связано с тем, что изменения скорости вращения двигателя достаточно просто было добиться изменением напряжения в якорной цепи двигателя. В качестве управляющих устройств использовались магнитные и электромашинные усилители, тиристорные и транзисторные регуляторы. В качестве систем обратной связи по скорости применялись в основном мало-мощные электрические генераторы (тахогенераторы).

Развитие микропроцессорной техники привело к тому, что в современных СА и САУ блок управления заменяется на микропроцессорное устройство, способное принимать и обрабатывать сигналы с датчиков привода и вырабатывать управляющее воздействие нужной формы на привод. В подобных СА и САУ используется широкая

номенклатура частотных преобразователей (инверторов, сервопреобразователей) со встроенными управляющими микропроцессорами, которые подбираются под конкретную мощность исполнительного двигателя. Сами эти преобразователи часто управляются от отдельного универсального ПК. Замкнутая САУ для управления двигателем называется сервосистемой, или сервоприводом. Выпускаются также микропроцессорные системы, в которых совмещены вместе функции частотного преобразователя и устройства, формирующего сигнал управления, т. е. функции формирования сигнала рассогласования и дальнейшего преобразования сигнала (например, реализация ПИД-закона регулирования).

Классическая сервосистема представляет собой любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости) и блок управления приводом (электронную схему), автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике (и соответственно на сравнивающем устройстве) согласно заданному внешнему значению (уставке). Таким образом, сервосистема — это САУ с управлением через обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения (скоростью, угловым положением).

К сервоприводам как к категории приводов относится множество различных регуляторов и усилителей с обратной связью, например, гидро-, электро- или пневмоусилители ручного привода управляющих элементов. Однако термин «сервопривод» чаще всего используется для обозначения электрического привода с обратной связью по положению, применяемого в автоматических системах для привода управляющих элементов и рабочих органов объектов автоматизации.

На рис. 4.15 представлена обобщенная функциональная схема сервосистемы на базе ПК, в которой реализуются все вышеперечисленные функции, включая обработку сигнала энкодера, содержащую информацию о частоте вращения вала двигателя и о его угловом положении. Применение энкодера в сочетании с микропроцессорной обработкой его сигнала увеличивает точность всей системы по сравнению с САУ, в которой используются аналоговые датчики.



Рис. 4.15. Обобщенная функциональная схема сервосистемы

Блок-схема ПК рассматриваемой сервосистемы с микропроцессорным управлением представлена на рис. 4.16. На схеме показаны замкнутые контуры управления по положению и скорости.

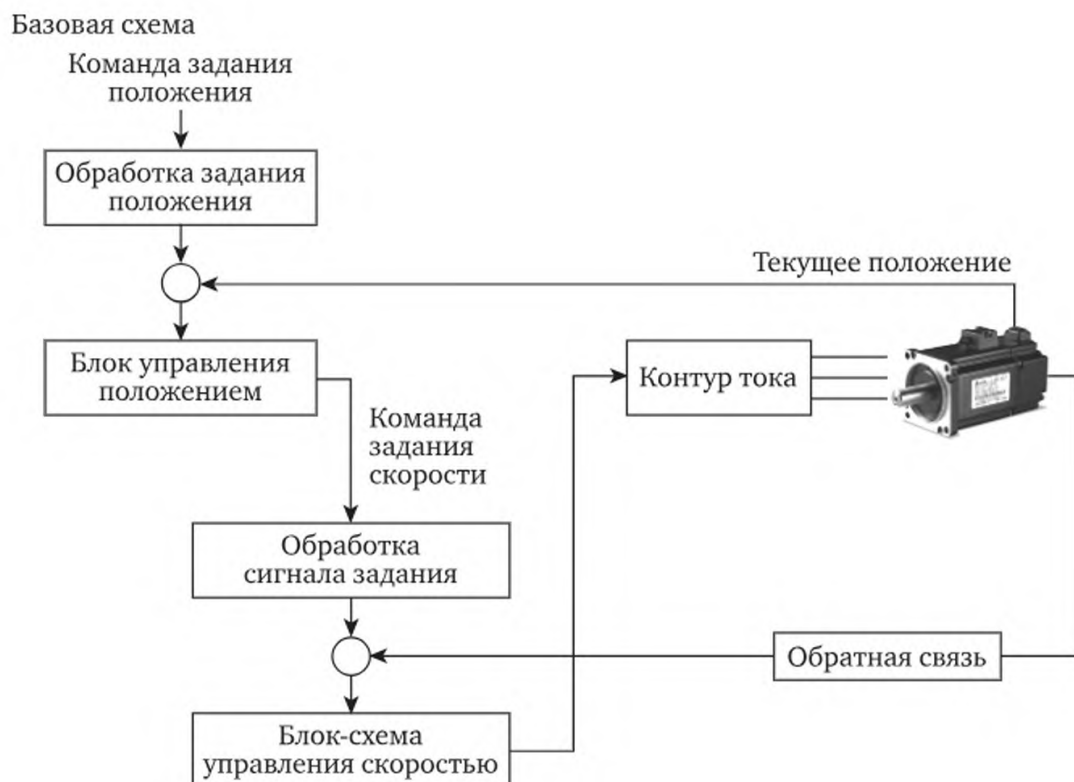


Рис. 4.16. Блок-схема сервопривода с микропроцессорным управлением

Сервопреобразователи имеют необходимые коммуникационные интерфейсы для связи с другими контроллерами (контроллерами верхнего уровня) и интерфейс соединения с ПК, через который возможно управление сервопреобразователем со стороны оператора.

Сервопреобразователь может программироваться на различные режимы работы, такие как:

- внешнее и внутреннее управление положением (позиционный режим — движение по заданной траектории с заданными параметрами);
- внешнее и внутреннее управление скоростью вращения;
- внешнее и внутреннее управление моментом;
- комбинация перечисленных выше режимов.

Для реализации перечисленных режимов в сервопреобразователях запрограммированы законы регулирования (П, ПИ и ПИД), и фактически они становятся программируемыми регуляторами с возможностью управления электронными компонентами частотных преобразователей.

Тема 5

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

5.1. Средства управления объектом автоматизации

Основное средство управления в автоматизированных системах — ЭВМ. Все ЭВМ, применяемые для управления компонентами автоматизированной системы управления (АСУ), можно разделить на два вида — универсальные и специализированные. В данной теме рассматриваются вопросы применения универсальных ЭВМ в составе АСУ.

Универсальные ЭВМ не предназначены специально для построения автоматизированных систем и в разной степени пригодны для этих целей. Однако не существует непреодолимых технических трудностей для использования любой ЭВМ в составе автоматизированной системы.

Выбор электронно-вычислительной машины для построения автоматизированной системы управления. Перечислим основные критерии выбора ЭВМ:

- 1) гибкость взаимодействия с нестандартными внешними устройствами (ВУ), т. е. с измерительной и управляющей аппаратурой АСУ;
- 2) соответствие вычислительной мощности ЭВМ и требуемой скорости обработки информации в ходе эксперимента;
- 3) наличие необходимого объема запоминающих устройств для накопления и оперативной обработки данных.

Оказывается, что архитектурная организация современных ЭВМ допускает сравнительно простую возможность их взаимодействия с большим количеством ВУ (в том числе и с нестандартными). Основные тенденции развития современных ЭВМ связаны с увеличением быстродействия и расширением объемов оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), что также все в большей степени удовлетворяет соответствующим критериям их выбора. Характерная особенность современных ЭВМ заключается в том, что они образуют программно совместимые семейства.

Модели внутри семейства могут различаться: по быстродействию, по объему памяти и другим возможностям, предоставляемым пользователю. Объединяет модели одного семейства то, что программа, написанная для одной из моделей семейства, может быть выполнена и на другой модели того же семейства. Внутри се-

мейства модели (как правило) совместимы снизу вверх, т. е. программа, написанная для модели, обладающей меньшими возможностями, может быть без изменений выполнена на модели с большими возможностями, но не наоборот.

Основная причина появления семейств ЭВМ связана с сохранением преемственности ПО. На разработку программного ПО тратятся средства большие, чем на разработку самой ЭВМ. Другая причина заключается в том, что на базе ЭВМ одного семейства значительно проще организовать многомашинные комплексы, т. е. иерархические структуры АСУ. Наиболее распространенными представителями семейств ЭВМ в автоматизированных системах в настоящее время являются семейства, совместимые с ЭВМ:

- *IBM PC* на процессорах фирмы *Intel*;
- *Macintosh* (фирмы *Apple*) на процессорах фирмы *Motorola*.

Каждое семейство представлено машинами, различающимися быстродействием и объемом ОЗУ в сотни раз относительно базового решения.

Работу ЭВМ будем рассматривать на трех уровнях. Нижний уровень составляют технические или аппаратные средства, т. е. электронные элементы, из которых состоит ЭВМ. Эти сведения необходимы для построения АСУ на основе данной ЭВМ. Без некоторых аппаратных компонентов ЭВМ невозможно построить ни одну современную АСУ (таймер, контроллеры прямого доступа к памяти ЭВМ, контроллеры прерываний).

Средний уровень — архитектура ЭВМ отражает доступные пользователю элементы ЭВМ:

- 1) набор регистров центрального процессора (ЦП);
- 2) адресное пространство;
- 3) система команд;
- 4) способы представления информации;
- 5) способы подключения ВУ.

Разработка аппаратного и программного обеспечения автоматизированной системы требует знания архитектурных возможностей ЭВМ. Архитектурные возможности ЭВМ помогают понять, каким образом объединяются ее отдельные компоненты в единую систему, сколько ВУ можно к ней подключить и каким образом.

Верхний уровень — ПО, разделяется на системное и прикладное ПО.

Все сказанное относится (в первую очередь) к универсальным ЭВМ. Универсальные ЭВМ в ряде случаев обладают значительной избыточностью аппаратных и программных средств для решения типовых задач автоматизированной системы.

Другой вид средств управления в АСУ — специализированные программируемые устройства (СПУ) или программируемые логические контроллеры (ПЛК — PLC), которые в ряде случаев обладают определенными преимуществами:

- по экономичности (нет ничего лишнего);
- быстродействию (система команд ориентирована на определенный круг задач);
- надежности при работе в экспедиционных условиях.

Обычно рассматривают аппаратную и программную надежность ПЛК. Под аппаратной надежностью понимается способность аппаратуры устойчиво функционировать в условиях окружающей среды и противостоять ее вредному воздействию.

Под *программной надежностью* понимается способность ПО устойчиво функционировать при возникновении ситуаций, требующих реакции в заданное время. Программная надежность определяется, прежде всего, степенью отлаженности программного обеспечения. *Аппаратная надежность* ПЛК обеспечивается тщательной герметизацией и вентиляцией компонентов АСУ.

В связи с бурным ростом производства миниатюрных *IBM PC*-совместимых компьютеров, последние все чаще стали использовать в качестве ПЛК в промышленности и научных исследованиях. Первое преимущество *IBM PC*-совместимых контроллеров связано с их открытостью, т. е. возможностью применять в автоматизированных системах современное оборудование, появляющееся на мировом рынке. Второе преимущество *IBM PC*-совместимых контроллеров заключается в их «родственности» с компьютерами верхнего уровня. Это приводит к снижению затрат на создание и модернизацию АСУ. Третье преимущество *IBM PC*-совместимых контроллеров — их более высокая надежность.

Как правило, ПЛК содержат все основные компоненты, входящие в состав ЭВМ: ЦП, ОЗУ, ПЗУ, интерфейс для связи с объектом и некоторыми стандартными периферийными устройствами. Все задачи реального времени в таких системах решаются аналогично задачам, решаемым автоматизированными системами на основе универсальных ЭВМ. Программное обеспечение, в простейшем случае, хранится в ПЗУ или загружается из сети.

Во многих случаях целесообразно использовать ПЛК в качестве компонент объектно ориентированных АС для сбора и предварительной обработки информации.

5.2. Архитектурные возможности электронно-вычислительных машин в автоматизированных системах

В составе ЭВМ можно выделить следующие основные элементы архитектуры:

- 1) центральный процессор (ЦП);
- 2) основную память;
- 3) каналы ввода-вывода информации.

5.2.1. Центральный процессор

Центральный процессор в автоматизированных системах используется для обработки данных, управления ходом вычислительного процесса, а также и управления аппаратурой АС. Для программиста (пользователя) ЦП — набор программно доступных регистров и система команд. При реализации отдельных методов обмена данными программист вынужден взаимодействовать непосредственно с некоторыми регистрами процессора.

Основные регистры процессора. *Счетчик команд (СчК)*, или программный счетчик всегда содержит адрес следующей выполняемой ЦП команды. При обычном выполнении программы в процессе выполнения очередной команды его содержимое инкрементируется на единицу. При изменении последовательности выполнения программы (например, запросами на обслуживание от ВУ) в СчК записывается адрес команды, на которую должен перейти процесс выполнения программы.

Указатель стека (УС) хранит адрес последней занятой ячейки стековой памяти. Во многих ситуациях в программе требуется временно запомнить информацию, а затем считывать ее в обратном порядке. Эта проблема решается посредством реализации стека LIFO (*Last in First out* — «последним прибыл — первым обслужен»). Стек всегда растет в сторону младших адресов. При включении элементов в стек производится автоматический декремент регистра УС, а при их извлечении — инкремент УС. Можно организовать стек типа FIFO (*First in First out* — «первый пришел — первый обслужен»).

Регистр состояния процессора (PCП — PSW (Processor Status Word)), или регистр флагов (*Flags*), содержит признаки выполнения арифметических и логических операций в арифметико-логическом устройстве (АЛУ) и управляет обслуживанием запросов на обслуживание от ВУ. По существу PCП представляет собой набор триггеров.

Регистры состояния процессоров основных типов ЭВМ: семейства Macintosh и семейства IBM PC. Процессор ЭВМ семейства Macintosh фирмы Motorola имеет PCП (PSW) следующего формата (в минимальном варианте):

15.....	7	6	5	4	3	2	1	0	Номер разряда
	P4	P2	P1	T	N	Z	V	C	Обозначение разряда

Обозначения разрядов регистра состояния:

C = 1, если есть перенос из старшего разряда;

V = 1, если арифметическое переполнение;

Z = 1, если нулевой результат;

N = 1, если отрицательный результат;

$T = 1$, если произошло внутреннее пребывание для отладки;
 $P4, P2, P1$ — приоритет выполняемой процессором программы — по отношению к запросам ВУ.

Программист может присвоить программе один из восьми уровней приоритета (0 .. 7), устанавливая отдельные разряды 5 .. 7 РСП. Самый высокий приоритет процессора = 7 ($P4 = P2 = P1 = 1$), при этом ни одно ВУ не может прервать текущую программу. Самый низкий приоритет — 0 имеет фоновая программа, которая выполняется, если нет запросов на обслуживание от ВУ.

Процессор ЭВМ семейства *IBM PC (Intel 8088/8086/80 286 и т. д.)* в реальном режиме работы использует 14 (16-разрядных) регистров. Из них четыре регистра (*AX, BX, CX, DX*) — это регистры данных (32-разрядные в 80 386 модели и в следующих за ней), каждый из которых помимо хранения операндов и результатов операций имеет еще и свое специфическое назначение:

- AX* — умножение, деление, обмен с устройствами ввода/вывода;
- BX* — базовый регистр в вычислениях адреса;
- CX* — счетчик циклов;
- DX* — определение адреса ввода/вывода.

Для регистров данных существует возможность раздельного использования обоих байтов. Например, для регистра *AX* они имеют обозначения *AL* — младший байт и *AH* — старший байт.

Следующие четыре внутренних регистра процессора — это сегментные регистры, каждый из которых определяет положение одного из рабочих сегментов:

- 1) *CS (Code Segment)* соответствует сегменту команд, исполняемых в данный момент;
- 2) *DS (Data Segment)* соответствует сегменту данных, с которыми работает процессор;
- 3) *ES (Extra Segment)* соответствует дополнительному сегменту данных;
- 4) *SS (Stack Segment)* соответствует сегменту стека.

В ЭВМ данного семейства программы и данные хранятся в раздельных областях памяти — сегментах. Каждый сегмент в реальном режиме работы ЦП может иметь объем до 64 Кбайт. Если сегменты используются не полностью, то могут частично перекрываться.

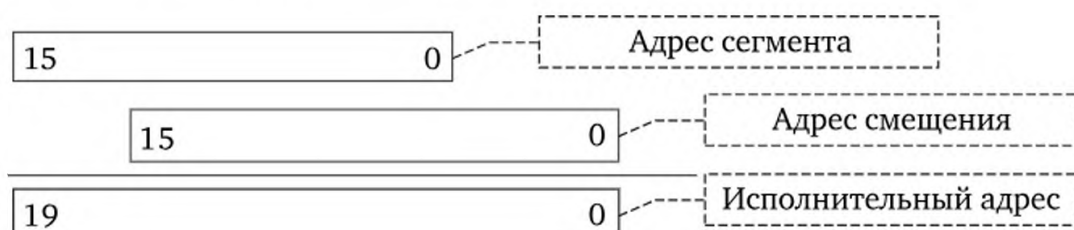
Следующие пять регистров процессора служат указателями, т. е. определяют смещение адреса в пределах сегмента:

- 1) *SP — Stack Pointer*;
- 2) *BP — Base Pointer*;
- 3) *SI — Source Index* — индекс источника;
- 4) *DI — Destination Index* — индекс приемника;
- 5) *IP — Instruction Pointer* — указатель команд.

Вместе с сегментными регистрами они используются для указания точного места в памяти. В защищенном режиме работы про-

цессора каждый сегмент может иметь объем 4 Гбайт, так как регистры 32-разрядные. Например, СчК образуется парой регистров *CS* и *IP* — (*CS : IP*), а УС — парой регистров *SS* и *SP* (*SS : SP*).

Для указания точного адреса памяти в реальном режиме ЦП содержимое регистра сегмента сдвигается влево на четыре разряда и складывается с содержимым регистра смещения.



Последний регистр *FLAGS*, или регистр состояния процессора (*PSW*). Из его 16 разрядов в реальном режиме работы ЦП используются только девять:

- 1) *CF* (*Carry Flag*) — флаг переноса при арифметических операциях;
- 2) *PF* (*Parity Flag*) — флаг четности результата;
- 3) *AF* (*Auxiliary Flag*) — флаг дополнительного переноса;
- 4) *ZF* (*Zero Flag*) — флаг нулевого результата;
- 5) *SF* (*Sign Flag*) — флаг знака (совпадает со старшим битом результата);
- 6) *TF* (*Trap Flag*) — флаг системного прерывания устанавливающий пошаговый режим выполнения программы (используется при отладке);
- 7) *IF* (*Interrupt-enable Flag*) — флаг разрешения прерываний. Сброс в «0» *IF* = 0 заставляет ЦП игнорировать запросы от ВУ до тех пор, пока *IF* = 1 не станет «1». Например, (*asm cli end*) — блокирует все ВУ, в том числе и клавиатуру;
- 8) *DF* (*Direction Flag*) — бит в регистре флага, показывающий, приводит ли выполнение строковой операции к увеличению или уменьшению значения индексного регистра;
- 9) *OF* (*Overflow Flag*) — флаг переполнения.

15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	00
				<i>OF</i>	<i>DF</i>	<i>IF</i>	<i>TF</i>	<i>SF</i>	<i>ZF</i>		<i>AF</i>		<i>PF</i>		<i>CF</i>

5.2.2. Основная память

Главным признаком, по которому можно отличить основную память от других видов памяти является возможность произвольного считывания ее ячеек и время обращения к любой ячейке основной памяти одинаково. В качестве основной памяти применяют ОЗУ и ПЗУ. ОЗУ используется для хранения команд и данных изменя-

ющихся в процессе работы системы. В ПЗУ хранятся загрузчики операционной системы (ОС), тестовые программы, драйверы стандартных ВУ.

Основная память разбивается на слова определенной длины n двоичных разрядов. Каждое слово основной памяти снабжается адресом. Минимальная адресуемая единица памяти, как правило, байт — $n = 8$ двоичных разрядов, даже если ЦП может оперировать со словами большими, чем 1 байт. Каждый разряд слова имеет номер, начиная с 0. Номера разрядов соответствуют показателям их числовых весов, записанных в виде степени числа 2. Каждые восемь разрядов памяти (байт) имеют адрес.

7	6	5	4	3	2	1	0	— номер разряда
0	0	1	1	0	0	1	1	0
								1
								2
								65535

Например: число $00\ 11\ 00\ 11 = 0 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 0 \cdot 128 + 0 \cdot 64 + 1 \cdot 32 + 1 \cdot 16 + 0 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 51_{10} = 33_{16} = 63_8$.

Если ЦП оперирует со словами длиной больше, чем 1 байт (восемь двоичных разрядов), память все равно допускает байтовую адресацию.

Двоичная система неудобна для восприятия человеком и слишком громоздка для записи. Для удобства и наглядности представления двоичного содержимого слова используются восьмеричная или шестнадцатеричная системы. В восьмеричной системе каждый знак может принимать восемь значений 0 .. 7. Каждая тройка двоичных разрядов эквивалентна одной восьмеричной цифре. В шестнадцатеричной системе для представления одного шестнадцатеричного знака требуется 16 значений: цифры 0 .. 9, и буквы A, B, C, D, E, F. Каждая четверка двоичных разрядов эквивалентна одной шестнадцатеричной цифре. Перевод двоичного числа в восьмеричное (шестнадцатеричное) заключается в разбивке справа налево двоичных разрядов числа на группы из 3 (4) бит с заменой каждой группы соответствующей восьмеричной (шестнадцатеричной) цифрой.

Важнейшие характеристики основной памяти:

1) объем памяти — число байт или слов хранимой информации. В современных ЭВМ может достигать 4 Гбайт;

2) время доступа — время от подачи сигнала на считывание (запись) до момента окончания операции. Составляет ~70 нс.

Форматы представления чисел в ОЗУ. Целые числа в среде *Borland Pascal* представляются в виде одно-, двух- или четырехбайтовых величин в дополнительном коде и содержат два поля: знак и значение. В качестве знакового используется старший бит числа.

7	6	0
Зн.	Число в дополнительном коде	

Одно- и двухбайтовые целые в *Borland Pascal* могут быть знаковые или беззнаковые. Диапазоны чисел зависят от количества байт в числе и наличии или отсутствии знака:

- однобайтовые (−128 .. +127) — *shortint*, (0 .. 255) — *byte*;
- двухбайтовые (−32 768 .. +32 767) — *integer*, (0 .. 65 535) — *word*;
- четырехбайтовые (−2 147 483 648 .. +2 147 483 647) — *longint*.

Вещественные числа содержат три поля:

- *S* — знак мантииссы (старший бит числа);
- *E* — порядок числа (смещенный);
- *M* — мантиисса числа.

<i>S</i>	<i>E</i> (порядок)	<i>M</i> (мантиисса)
----------	--------------------	----------------------

Значение числа $X = S \cdot M \cdot 2^{(E-P)}$, где *P* — смещение порядка. Вещественные числа в *Pascal* могут занимать от 4 до 10 байт.

Длина (байт)	Название	Количество значащих цифр
4	<i>single</i>	7 .. 8
6	<i>real</i>	11 .. 12
8	<i>double</i>	15 .. 16
10	<i>extended</i>	19 .. 20

Программист должен учитывать, в каком формате ВУ передает и принимает данные.

5.2.3. Каналы ввода-вывода информации

Каналы ввода-вывода информации служат для передачи данных между ЦП, ОЗУ и ВУ — средство взаимодействия ЭВМ с внешним миром. По способу соединения между собой ЦП, основной памяти и внешних устройств архитектуры ЭВМ можно разделить на два вида.

1. ЭВМ с общим магистральным каналом обмена данными (рис. 5.1.).



Рис. 5.1. Функциональная схема соединения компонентов в ЭВМ на основе общего магистрального канала

Магистральный канал — пассивный многопроводный канал связи по которому передаются сигналы разного функционального назначения. Набор проводников, по которым передаются сигналы одного функционального назначения, называется *шиной*. Различают шину данных (ШД), шину адресов (ША) и шину управления (ШУ).

Для соединения ЦП, основной памяти и ВУ используется одна совокупность шин, называемая общим магистральным каналом. Основные черты архитектуры на основе единого магистрального канала:

- все устройства подключаются к магистрали одинаково — единый интерфейс;
- имеется одно адресное пространство для основной памяти и ВУ;
- определенная часть из общего количества возможных адресов зарезервирована для регистров ВУ и ПЗУ;
- оставшаяся часть адресов используется ОЗУ;
- 8 Кбайт или 4 К 16 разрядных слов отведены для регистров ВУ;
- для обращения к ВУ используются те же команды, что и для обращения к памяти;
- ВУ имеют возможность обмена данными с любым регистром ЦП.

	0
	400 ₈
Основная память	1000 ₈
Устройства пользователя	160 000 ₈
Основные ВУ, УВК, ПЗУ	170 000 ₈
	177 777 ₈

Подобную архитектуру каналов ввода вывода данных имеют ЭВМ семейства *Macintosh* на основе МП фирмы *Motorola*.

2. ЭВМ с изолированными магистралями (с двумя магистральными каналами обмена данными) (рис. 5.2).

Основные черты архитектуры на основе изолированных магистральных каналов:

- с функциональной точки зрения здесь имеются два тракта передачи кодов: ЦП ↔ ОЗУ, ПЗУ и ЦП ↔ ВУ;
- есть две изолированные области адресов — область адресов основной памяти и область адресов ВУ;

- обращение к каждой из областей осуществляется различными группами команд;
- более простой, чем в предыдущем случае, интерфейс для ВУ.

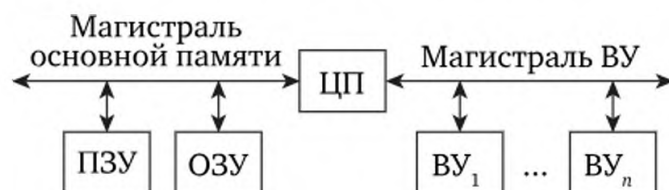


Рис. 5.2. Функциональная схема соединения компонентов в ЭВМ на основе архитектуры с изолированными магистральными каналами

Подобную структуру каналов ввода вывода данных имеют ЭВМ семейства *IBM PC*, выполненные на процессорах *Intel 8088/8086/80 286/80 386/80 486*, а также на восьмиразрядных процессорах *Intel 8080/8085*.



5.2.4. Структура магистралей электронно-вычислительных машин

Все устройства АС связаны с ЦП через магистраль ЭВМ. В соответствии с видами сигналов, передаваемых по магистрالي, различают три шины в магистрале ЭВМ (рис. 5.3).

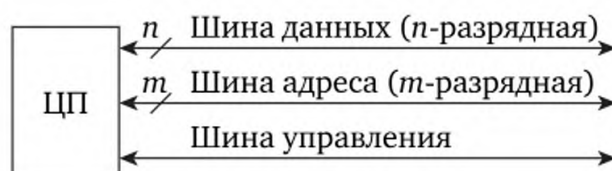


Рис. 5.3. Структура магистралей ЭВМ

Шина данных n -разрядная двунаправленная используется для передачи данных между ЦП и основной памятью или между ЦП и ВУ. Данные могут передаваться параллельно по n разрядов одновременно, где n принимает значения: 16, 32, 64 — для памяти, 8 или 16 — для ВУ.

AT286, AT386, 486, Pentium. Шина адреса m -разрядная используется для адресации основной памяти и ВУ. Код, установленный на ША, представляет собой ключ к ячейке памяти или регистру ВУ и соответствует только одному устройству. В каждый момент времени только одно ВУ будет связано с ЦП. m может принимать значения 16, 18, 20, 22, 24, 32. С помощью m -разрядной адресной

шины можно адресовать до 2^m устройств — ячеек памяти или регистров ВУ:

$$2^m = 64 \text{ К}, 256 \text{ К}, 1 \text{ М}, 4 \text{ М}, 16 \text{ М}, 4 \text{ Г},$$

где 1 Кбайт = 2^{10} = 1024 байт, 1 Мбайт = 2^{20} = 1024 Кбайт, 1 Гбайт = 2^{30} = 1024 Мбайт.

Шина управления включает проводники, по которым передаются управляющие сигналы. Каждый тип микропроцессора имеет уникальную систему сигналов управления. Конкретное описание всех линий ШУ дается в техническом описании на микропроцессор.

5.2.5. Типовые сигналы шины управления

Управляющие сигналы определяют направление передачи данных по отношению к ЦП и служат для инициирования различных способов обмена данными (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Типовые сигналы ШУ для обмена данными по магистрали ЭВМ

Наименование сигнала	Направление передачи по отношению к ЦП	Архитектура	Назначение сигнала
Чтение	Вывод	1, 2	Считывает в регистр ЦП одно n -разрядное слово по указанному адресу из ячейки ОЗУ (1, 2) или регистра ВУ (1). В двухшинных архитектурах эти сигналы различны
Ввод	— // —	2	Считывает в регистр ЦП одно n -разрядное слово по указанному адресу из регистра ВУ
Запись	Вывод	1, 2	Записывает в ячейку ОЗУ (1, 2) или регистр ВУ (1) по указанному адресу одно n -разрядное слово из регистра ЦП. В двухшинных архитектурах эти сигналы различны
Вывод	— // —	2	Записывает в регистр ВУ одно n -разрядное слово из регистра ЦП по указанному адресу
Запрос прерывания (ЗП)	Ввод	1, 2	Требование ВУ прерывания текущей программы ЦП и его приоритетное обслуживание
Разрешение прерывания (РП)	Вывод	1, 2	ЦП разрешает ВУ прерывание текущей программы для выполнения операций по его обслуживанию

Наименование сигнала	Направление передачи по отношению к ЦП	Архитектура	Назначение сигнала
Запрос шины (ЗШ)	Ввод	1, 2	Требование ВУ к ЦП освободить магистраль и предоставить ВУ возможность обмена данными с ОЗУ, минуя ЦП
Разрешение шины (РШ)	Вывод	1, 2	ЦП удовлетворяет требование ВУ и отключается от шин магистрали

При обмене данными на магистрали всегда действуют два устройства:

- 1) задатчик, или ведущий;
- 2) исполнитель, или ведомый.

Задатчиком, как правило, является ЦП, а исполнителем — ячейка ОЗУ или регистр ВУ. Задатчик всегда управляет ША и ШУ. Исполнитель реагирует на адресные и управляющие сигналы задатчика и может выставлять или принимать данные с ШД.

Вывод данных			Ввод данных		
(ЦП)	Магистраль (ОЗУ)		(ЦП)	Магистраль (ОЗУ)	
Задатчик		Исполнитель	Задатчик		Исполнитель
Адрес	ША	Адрес	Адрес	ША	Адрес
Запись	ШУ	Запись	Чтение	ШУ	Чтение
Данные	ШД	Данные	Данные	ШД	Данные

Действия процессора по передаче одного слова (байта) по системной шине называются *циклом шины*.

5.3. Принципы организации обмена данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами

Под ВУ будем иметь в виду стандартные периферийные устройства ЭВМ, или устройства управления объектом автоматизации (т. е. УСО), подключаемые пользователем. Чтобы управлять объектом автоматизации (ОА) или измерять параметры ОА, необходимо передавать УСО информацию или принимать из УСО информацию. Иными словами, обмениваться данными между ЦП, аппаратурой УСО

и ОЗУ. Известны два возможных режима обмена данными между ЭВМ и ВУ:

- программно управляемая передача данных;
- непосредственный (прямой) доступ ВУ к оперативной памяти ЭВМ.

Программно управляемая передача осуществляется пословно, под управлением процессора. Передача данных из ВУ в оперативную память ЭВМ выполняется следующей последовательностью шагов ЦП и ВУ (рис. 5.4):

1) ВУ подготавливает слово (байт) данных и по команде ЦП либо с помощью своих аппаратных средств помещает их в интерфейс ввода устройства;

2) ЦП считывает данные из интерфейса в один из своих внутренних регистров;

3) ЦП пересылает данные из регистра в ячейку ОЗУ по указанному в программе адресу.



Рис. 5.4. Последовательность операций программно управляемого обмена данными

Передача слова (байта) данных из оперативной памяти к ВУ выполняется той же последовательностью операций, выполняемой в обратном порядке:

1) ЦП считывает слово данных из ячейки ОЗУ в один из своих внутренних регистров;

2) ЦП пересылает слово данных из внутреннего регистра ЦП в интерфейс вывода;

3) ВУ по команде ЦП либо с помощью своих аппаратных средств считывает данные из интерфейса.

Передача данных в режиме прямого доступа ВУ к оперативной памяти ЭВМ (ПДП) осуществляется также пословно под управлением аппаратных средств, называемых контроллером ПДП, минуя ЦП. Процессор в обмене данными участие не принимает. Скорость передачи при этом существенно возрастает (в 10 раз и более).

Режим ПДП обмена применяется, когда программа обмена занимает времени больше, чем это допустимо или, например, при передаче больших массивов данных.

Передача данных в режиме ПДП из ВУ в память ЭВМ выполняется следующей последовательностью шагов (см. рис. 5.4):

1) ВУ подготавливает данные и помещает их в интерфейс ввода канала ПДП;

2) контроллер ПДП (КПДП) передает данные из интерфейса ПДП в ячейку ОЗУ.

Передача слова (байта) данных из оперативной памяти к ВУ выполняется той же последовательностью операций, выполняемой в обратном порядке:

- 1) КПДП выбирает данные из ячейки ОЗУ и помещает их в интерфейс канала ПДП;
- 2) ВУ считывает данные из регистра интерфейса.

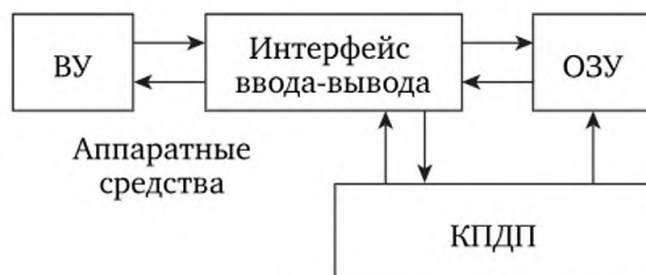


Рис. 5.5. Последовательность операций обмена данными в режиме ПДП

Основное отличие рассмотренных режимов обмена данными заключается в способе управления обменом:

- в режиме программно управляемого обмена, передачей данных управляет ЦП, выполняющий специальную программу обмена данными;
- в режиме ПДП, передачей управляет контроллер ПДП (КПДП), т. е. аппаратные средства УСО.

В любом режиме передача выполняется через интерфейс ВУ.

Интерфейс при обмене данными выполняет следующие функции:

- буферное хранение (в ряде случаев преобразование) данных;
- устранение временных различий в работе ВУ и ЦП или КПДП;
- передача информации о состоянии ВУ в ЦП или КПДП;
- передача приказов от ЦП или КПДП к ВУ.

5.4. Основные методы программно управляемой передачи данных

Известны три метода программно управляемой передачи данных:

- 1) безусловный обмен;
- 2) обмен данными по готовности ВУ;
- 3) обмен с прерыванием текущей программы ЦП.

В различных ситуациях, возникающих при работе АС, применяется тот или иной метод. Рассмотрим все методы программно управляемого обмена в следующей последовательности:

- 1) алгоритм обмена;
- 2) функциональная схема интерфейса;

- 3) техническая реализация интерфейса (на конкретном примере);
- 4) программная реализация алгоритма обмена;
- 5) пример программирования.

5.4.1. Безусловный обмен данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами

Безусловный обмен может использоваться только для таких ВУ, быстродействие которых выше чем быстродействия ЦП, либо данные передаются через такие интервалы времени, по истечении которых ВУ будет готово к обмену. Основное требование: ВУ должно быть готово к приему или передаче слова данных за время, равное времени выполнения команды ввода-вывода ЦП.

Блок-схема алгоритма безусловной передачи слова данных на рис. 5.6 наиболее проста.



Рис. 5.6. Блок-схема алгоритма безусловной передачи слова данных

Команды передачи данных (ввода-вывода) вставляются в программу в указанном месте. Преимущества: Безусловный обмен реализуется при минимальных затратах программных и аппаратных средств. Не требуется проверки состояния ВУ и согласования временных различий в работе ЦП и ВУ, так как ВУ всегда готово принять или передать слово данных. В задачу интерфейса входит лишь буферное хранение данных и, возможно, передача приказов от ЦП на инициализацию обмена. Недостаток: устройство должно быть постоянно готово к обмену данными.

Функциональная схема интерфейса безусловного обмена данными включает два интерфейса.

1. Интерфейс безусловного вывода данных из ЦП во ВУ (рис. 5.7, 5.8).

Внешнее устройство через свой интерфейс непосредственно подключено к магистрали ЭВМ.

Назначение компонентов интерфейса:

- буферный регистр данных (РД) служит для временного хранения n -разрядного слова данных, подготовленного в ОЗУ для вывода во ВУ;
- информационные вентили $2И \cdot n$ (n двухвходовых схем «2И»), пропускают данные с ШД ЭВМ в РД в момент приема внутренней команды интерфейса «Запись в РД»;
- дешифратор внутренних команд (ДВК), включающий «дешифратор адреса» и схему вентилей «2И», формирует внутреннюю

команду интерфейса «Запись в РД» на выходе, когда на ША установлен адрес РД, а на ШУ — сигнал «Вывод».

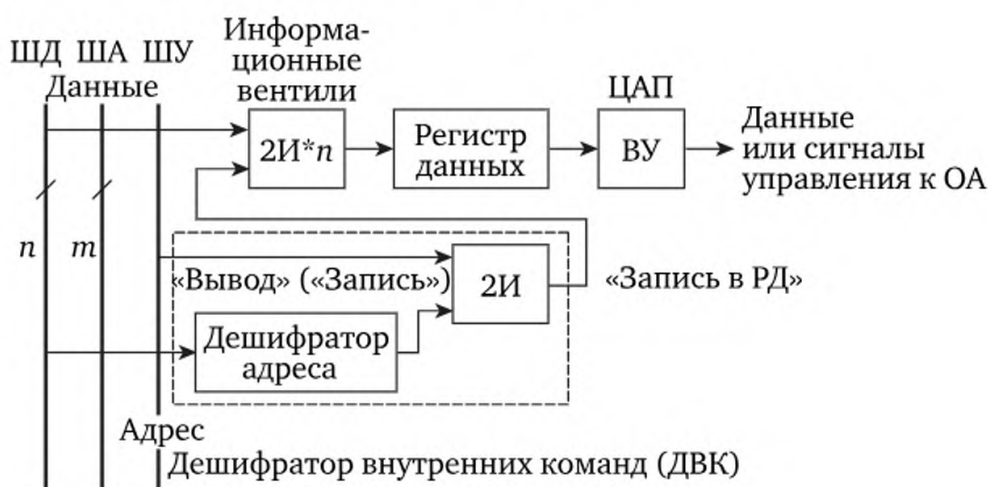


Рис. 5.7. Функциональная схема интерфейса безусловного вывода данных

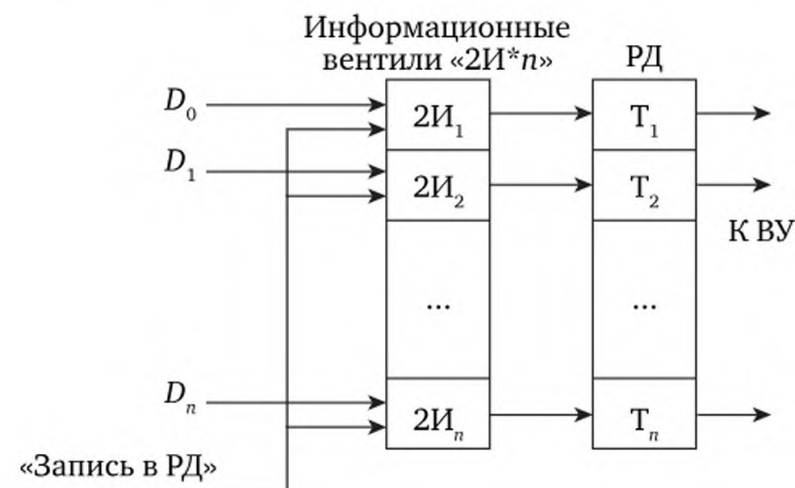


Рис. 5.8. Схема передачи данных из внутреннего регистра процессора к внешнему устройству

Данные записываются в РД, если ЦП одновременно устанавливает сигналы:

- 1) данные на ШД;
- 2) адрес РД ВУ на ША;
- 3) управляющий сигнал «Вывод» («Запись») на ШУ.

Внутренняя команда интерфейса «Запись в РД» появляется на выходе дешифратора внутренних команд, открываются информационные вентили, и данные с ШД передаются в РД.

Регистр данных состоит из n элементов памяти (по числу линий ШД). Обычно это триггеры. Триггер — одноразрядный элемент памяти, предназначенный для хранения 1 бита данных. Если на входах триггеров РД появляется информация в виде «1» или «0», то она

запоминается в РД. На входах РД установлены n двухвходовых схем «И» (2И), называемых информационными вентилями.

Один из входов каждого вентиля соединен с соответствующим разрядом ШД D_i (т. е. D_0, D_1, \dots, D_n). Вторые входы вентилях соединяются с выходом дешифратора внутренних команд (ДВК), на котором формируется команда «Запись в РД». Информационные вентили пропускают данные с ШД ЭВМ в РД интерфейса, если на выходе дешифратора внутренних команд появляется внутренняя команда интерфейса «Запись в РД».

Если ВУ использует слова разрядности меньше n , то РД может содержать меньшее число элементов памяти. Если разрядность слова превышает n , то используют два или более РД, при этом данные передаются процессором несколькими последовательными командами вывода.

Дешифратор внутренних команд (ДВК) включает дешифратор адреса и ряд двухвходовых схем «И». Дешифратор адреса представляет собой комбинационную логическую схему, имеющую m входов (по числу линий ША) и от 1 до 2^m выходов (здесь используется только один выход, так как только один адрес используется в интерфейсе). При любой комбинации «0» и «1» на входах дешифратора, только один из его выходов будет в активном состоянии (логическая «1»), следовательно, в каждый момент времени с ЦП будет связано только одно устройство. Выход дешифратора адреса ВУ установится в активное состояние «1», если на ША будет установлен адрес регистра данных этого ВУ. Внутренняя команда интерфейса («Запись в РД») появляется на выходе ДВК, если ЦП одновременно установит сигналы:

- «Вывод» — на ШУ;
- «Адрес РД интерфейса ВУ» — на ША.

Эта команда открывает информационные вентили, и данные с ШД поступают на входы РД и фиксируются в нем. ВУ, в такой ситуации, должно своими аппаратными средствами считывать данные из РД.

2. Интерфейс безусловного ввода строится аналогично интерфейсу безусловного вывода данных и включает те же компоненты. Изменяется лишь порядок их соединения (рис. 5.9).

Один из входов каждого вентиля соединен с соответствующим разрядом РД. Вторые входы вентилях соединяются с выходом ДВК — «Чтение РД». Информационные вентили пропускают данные из РД на ШД ЭВМ, если на выходе дешифратора внутренних команд появляется внутренняя команда «Чтение РД». Команда «Чтение РД» появляется если ЦП одновременно установит: на ШУ — сигнал «Ввод», на ША — адрес РД интерфейса ВУ. Внутренняя команда «Чтение РД» открывает информационные вентили, данные из РД поступают на ШД и считываются процессором.

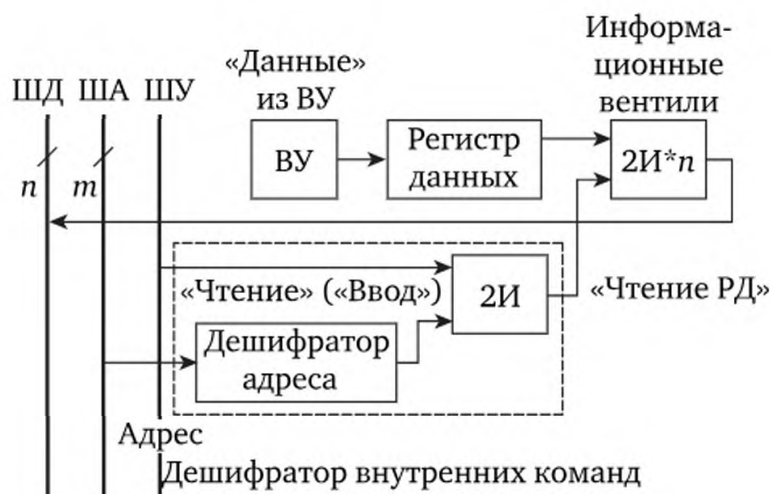


Рис. 5.9. Функциональная схема интерфейса безусловного ввода данных

Аналогичные схемы для ввода данных в ЭВМ из ВУ или вывода данных во ВУ используются практически во всех интерфейсах, использующих любой из методов обмена данными. Число и назначение регистров при этом может изменяться, например, интерфейс безусловного обмена может содержать регистры управления, с помощью которых передаются не данные, а приказы от ЭВМ к ВУ.

Установка различных комбинаций «0» и «1» в РУ позволяет изменять режим работы ВУ или инициировать операции обмена данными между ВУ и РД интерфейса.

Для программного управления подобными ВУ необходимо располагать информацией о программной модели интерфейса, а именно:

- числом регистров интерфейса и их назначением;
- адресами регистров интерфейса;
- числом бит и назначением отдельных битов регистров;
- способом доступа ЦП к каждому из регистров.

5.4.1.1. Техническая реализация устройства связи с объектом в автоматизированных системах на основе электронно-вычислительной машины семейства IBM

Изучение методов программного обмена данными между ЭВМ и ВУ проводится с помощью автоматизированной системы (рис. 5.10), в состав которой входят: ЭВМ семейства IBM, интерфейс программного обмена (подключенный непосредственно к магистрали ввода вывода ЭВМ) и ряд устройств связи с объектом (УСО): цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), программируемый интервальный таймер (ПИТ) и регистры цифрового ввода и вывода данных.

Эволюция АЦП, ЦАП и других компонентов АС сделали подобные встраиваемые платы ввода вывода сигналов естественным выбором для многих применений. Преимущества АС на основе компьютера

проистекают из самих возможностей ПК. Устанавливая УСО в компьютер, вы сразу же получаете доступ к возможностям обработки, представления и хранения данных. Поток данных превращается в полезную информацию быстрее, чем когда бы то ни было.

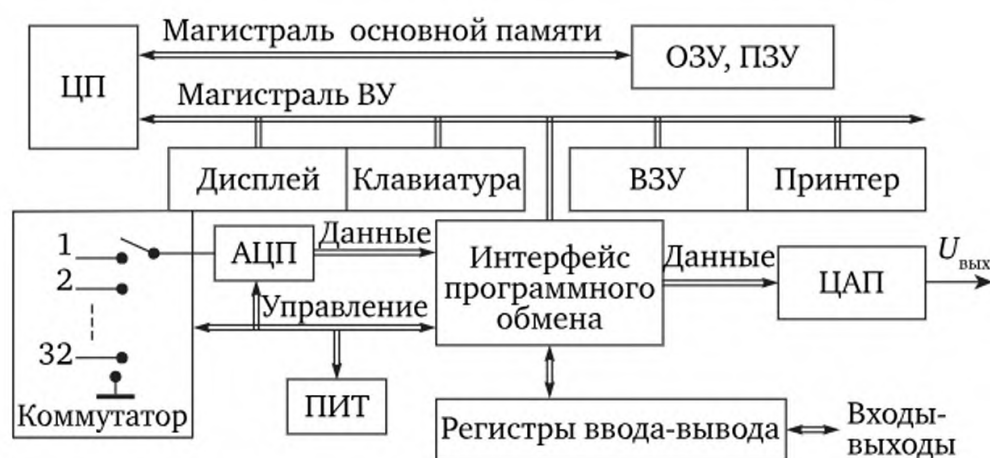


Рис. 5.10. Функциональная схема АС на основе ЭВМ семейства IBM и интерфейсной платы L-154

Промышленность во всем мире выпускает множество подобных устройств:

- цифровые осциллографы;
- мультиметры;
- генераторы сигналов;
- анализаторы сигналов.

Их отличие от рассматриваемого случая в том, что они еще и могут решать задачи управления объектом и измерения параметров объекта автоматизации своими аппаратными средствами, не обращаясь к операционной системе.

Программная модель интерфейса включает 12 регистров, два из которых двенадцатиразрядные, а остальные 10 — восьмиразрядные.

Начальный адрес интерфейса в области устройств ввода-вывода магистралей ЭВМ равен $0300h$ (может устанавливаться с помощью переключателей в диапазоне $0300h$, $0310h$, $0330h$ или $0340h$) (здесь и далее h указывает на признак шестнадцатеричной системы счисления). Если в автоматизированной системе включено несколько аналогичных устройств, то необходимо установить для каждого устройства разные адреса. Адреса всех остальных регистров приводятся относительно начального (табл. 5.2).

Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) преобразует 12-разрядный цифровой код, поступающий из ЭВМ в аналоговый сигнал в виде напряжения. Модуль ЦАП может использоваться для вывода управляющих воздействий на исполнительные органы объекта автоматизации. Относительный адрес регистра данных ЦАП = 0. Регистр данных ЦАП доступен процессору только для записи.

Карта регистров интерфейсной платы L-154

№ п/п	Наименование регистра	Относи- тельный адрес регистра	Тип доступа ЦП	Размер регистра (число бит)	Назначение регистра
<i>ЦАП</i>					
1	Регистр данных ЦАП	0	Запись	12	Код для записи в ЦАП
<i>АЦП — коммутатор — усилитель</i>					
2	Регистр данных АЦП	0	Чтение	12	Результат преобразования напряжения в код АЦП
3	Регистр управления АЦП – Коммутатор – Усилитель	2	Запись	8	Установка канала мультиплексора, режима подключения и диапазона измерения входных сигналов АЦП
4	Регистр состояния	2	Чтение	8	Состояние АЦП и таймеров-счетчиков
5	Регистр запуска АЦП	4	Запись	8	Запуск АЦП на измерение
<i>Таймеры-счетчики</i>					
6	Канал 0	8	Запись/чтение	8	Программирование канала 0
7	Канал 1	9	Запись/чтение	8	Программирование канала 1
8	Канал 2	<i>Ah</i>	Запись/чтение	8	Программирование канала 2
9	Регистр управления таймеров	<i>Bh</i>	Запись/чтение	8	Установка параметров каналов
10	Регистр прерываний	<i>Fh</i>	Запись	8	Разрешение/запрет прерываний от таймера
<i>Цифровые линии ввода-вывода</i>					
11	Цифровые входы	3	Чтение	8	Чтение цифровых линий с внешнего разъема
12	Цифровые выходы	3	Запись	8	Установка/сброс цифровых линий с внешнего разъема

Технические характеристики ЦАП:

- диапазон изменения выходного сигнала $U_{\text{вых}} = \pm 5,12 \text{ В}$; $(-5,12 \div +5,12 - \Delta U)$;
- разрешающая способность $\Delta U = 2,5 \text{ мВ}$;
- максимальная частота преобразования $F_{\text{пр}} = 100 \text{ кГц}$.

Код, записываемый в ЦАП, и напряжение, устанавливаемое на его выходе, связаны выражением

$$U_{\text{вых}} = \Delta U \cdot (\text{КОД} - 2048),$$

где КОД — целое число в диапазоне 0—4095 или $(0 \div (2^{12} - 1))$.

Напряжение на выходе кратно $\Delta U = 2,5 \text{ мВ}$. Установить на выходе ЦАП напряжение, не кратное ΔU , невозможно. В выражении $\text{КОД} = 2048 + U_{\text{вых}}/\Delta U$, результат необходимо округлять до ближайшего целого. Быстродействие ЦАП выше быстродействия процессора, следовательно, он всегда готов к обмену данными с ЭВМ. Для таких устройств можно применить безусловный метод обмена данными. Если подавать в регистр ЦАП код с частотой выше 100 кГц, то на выходе появляется динамическая ошибка.

5.4.1.2. Программные средства реализации безусловного обмена данными между ЭВМ и внешними устройствами

Для обращения к регистрам ВУ в среде программирования *Borland Pascal* имеются два предварительно объявленных массива с именами *Port* и *PortW*:

```
var Port: array [0 .. 65535] of byte; PortW: array [0 .. 65534] of word;
```

Индексы массивов соответствуют абсолютным адресам регистров ВУ. При обращении к элементам *PortW* используется указанный в выражении адрес и следующий за ним, больший на единицу. Присвоение значения элементу массива *Port* или *PortW* приведет к записи в регистр с указанным адресом. Упоминание элемента *Port* или *PortW* в правой части выражения приведет к чтению из регистра с указанным адресом.

Примеры:

- $J := \text{Port} [\$21]$; {Чтение регистра масок контроллера прерываний ЭВМ.};
- $\text{PortW} [\$300] := 4048$; {Запись в регистр данных ЦАП 16-разрядного числа для установки напряжения 5 В на его выходе.}.

Программирование канала управления при безусловном способе обмена данными. Генерация синусоидального сигнала амплитудой 5 В, с максимально возможной частотой на выходе ЦАП:

$$u(i) = U_{\text{max}} \cdot \sin(2\pi i / M),$$

где $U_{\text{max}} = 5 \text{ В}$, число точек на периоде сигнала $M = 100$.

Формула $U_{вых} = \Delta U * (КОД - 2048)$ связывает КОД, записываемый в ЦАП, и напряжение на его выходе. $КОД = U(i)/\Delta U + 2048 = 2048 + (U_{max}/\Delta U) * \sin(2\pi i/M)$ должен быть округлен до целого значения:

```
Program Demo_Sin;
uses crt; const M = 100; F = 2*pi/M;
var U : array [1..M] of integer; i, j{, step} : integer;
Procedure Wait (i: word); var j: word; begin for j:=1 to i do;
end;
Begin for i:= 1 to M do U[i]:= Round (2048+2000*sin(F*(i-1)));
i:=1; repeat {Wait (n);}
PortW[$300]:=U[i]; inc(i); if i > M then dec (i, M);
until keypressed; while keypressed do readkey; End.
```

5.4.2. Обмен данными между электронно-вычислительной машиной и внешним устройством по готовности внешнего устройства

Обмен данными по готовности ВУ выполняется под управлением программы, при условии, что устройство находится в состоянии готовности к обмену (рис. 5.11).

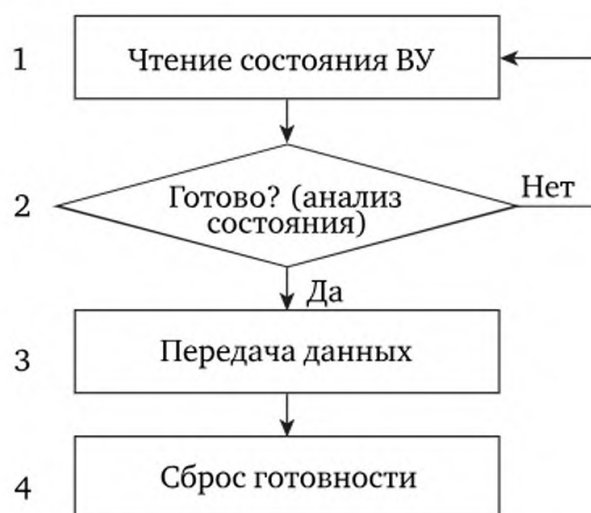


Рис. 5.11. Блок-схема алгоритма передачи одного слова данных по готовности ВУ

Иными словами, в устройстве имеются данные для чтения или устройство готово принять новые данные от ЦП. Перед выполнением передачи каждого слова данных ЦП должен проверить состояние ВУ и выполняет обмен данными только в случае готовности устройства. На шаге 1 выполняется команда ввода в ЦП информации о состоянии ВУ. Интерфейс должен предоставить такую информацию.

На следующем шаге 2 анализируется эта информация и принимается решение:

- если ВУ не готово к обмену данными, ЦП возвращается к шагу 1;
- если ВУ готово к обмену, ЦП выполняет команду 3 «Передача данных».

Команда «Передача данных» выполняется так же, как и при безусловном способе обмена данными. Завершается обмен командой 4 «Сброс готовности» ВУ, показывая, что передача очередного слова данных завершена. Сброс сигнала готовности может выполняться как командой ЦП, так и аппаратными средствами интерфейса.

Преимущество: данный способ обмена является идеальным, в смысле согласования временных различий в работе ЦП и ВУ и может использоваться для любых по быстродействию ВУ. Недостаток: Потери машинного времени на ожидание момента готовности ВУ к обмену данными.

При взаимодействии с низкоскоростными ВУ, ЦП большую часть времени тратит на ожидание момента готовности их к обмену.

Пример: Лазерный принтер *HP LJ6L* имеет скорость печати 6 страниц/мин = $(6 \cdot 40 \text{ строк} \cdot 60 \text{ символов}) / 60 \text{ секунд} = 240 \text{ символов/с}$. Время печати одного символа $1000 \text{ мс} / 240 \text{ символов} = 4,1 \text{ мс/символ}$ ($\sim 4 \text{ мс/символ}$). Центральный процессор передает команду на вывод очередного символа $\sim 2 \text{ мкс}$. Следовательно, только 0,05 % времени тратится на обмен данными, а 99,95 % времени — на ожидание готовности принтера.

Как при безусловном способе обмена, так и при обмене данными по готовности ВУ играет пассивную роль, предоставляя для чтения или записи свои регистры данных. Инициатором обмена в обоих случаях является ЦП.

5.4.2.1. Функциональная схема интерфейса обмена данными по готовности внешнего устройства

Интерфейс обмена данными по готовности содержит все компоненты интерфейса безусловного обмена данными, а также регистр состояния внешнего устройства (PCBU) с элементами считывания и записи данных.

1. Функциональная схема интерфейса ввода данных из ВУ в ЭВМ по готовности. В качестве ВУ может использоваться АЦП, который считывает информацию с датчиков объекта автоматизации. Из ВУ поступают данные в РД интерфейса и сигнал готовности данных в РС интерфейса (рис. 5.12).

Дешифратор внутренних команд (ДВК) в такой схеме (рис. 5.13) содержит дешифратор адреса и три схемы 2И, с помощью которых формируются различные внутренние команды интерфейса.

Дешифратор внутренних команд дешифрирует два адреса и формирует три команды: «Чтение РД», «Чтение РС» и «Запись РС». Регистр состояния внешнего устройства в простейшем случае (рис. 5.14) содержит один элемент памяти — триггер, называемый триггером флага готовности ВУ (ТФГ), или просто флагом готовности.

Если ВУ занято выполнением предыдущей операции или обрабатывает данные, то оно сохраняет флаг готовности в «сброшенном»

дующему циклу обмена данными. Сброс ТФГ может выполняться программными средствами ЦП, например, с помощью команды «Запись» по адресу РСБУ, либо аппаратными средствами интерфейса, например, командой «Чтение» данных из РД.

2. Функциональная схема интерфейса вывода данных из ЭВМ по готовности ВУ. Схема строится аналогично схеме интерфейса ввода данных по готовности, меняется порядок соединения элементов и некоторые внутренние команды интерфейса (рис. 5.15).



Рис. 5.15. Функциональная схема интерфейса вывода данных из ЭВМ по готовности ВУ

Отметим следующее:

- 1) ТФГ может быть установлен в «1» только ВУ сигналом «Готовность»;
- 2) ЦП может только считать содержимое ТФГ и сбросить его в нулевое состояние.

Различные ВУ устанавливают и сбрасывают ТФГ в следующих ситуациях. *Принтер* устанавливает ТФГ после того, как напечатал предыдущий символ и готов к принятию кода следующего символа. Сброс ТФГ выполняется аппаратными средствами интерфейса при передаче ЦП очередного символа принтеру. *Клавиатура* устанавливает ТФГ после нажатия оператором клавиши, когда код символа нажатой клавиши находится в РД клавиатуры и может быть считан процессором. Сбрасывается ТФГ после чтения кода символа ЦП. Аналого-цифровой преобразователь должен устанавливать ТФГ после окончания преобразования напряжения в цифровой код и передачи кода в РД интерфейса. Сбрасывается ТФГ после окончания операции передачи данных в РД интерфейса.

5.4.2.2. Техническая реализация интерфейса обмена данными по готовности

Реализацию интерфейса обмена данными по готовности и алгоритм обмена рассмотрим на примере ввода данных в ОЗУ из мо-

дуля АЦП (интерфейсной платы L-154) в АС на основе ЭВМ семейства *IBM*. Аналого-цифровой преобразователь предназначен для преобразования входного напряжения U_x , зафиксированного во время выборки, в 12-разрядный параллельный код. Он измеряет мгновенное значение сигнала. Вход АЦП (рис. 5.16) соединяется с внешними аналоговыми сигналами объекта через измерительный усилитель и один из входов 32-(16-)разрядного коммутатора. На входы коммутатора могут поступать сигналы с датчиков объекта, а выход коммутатора соединен с входом АЦП через измерительный усилитель.

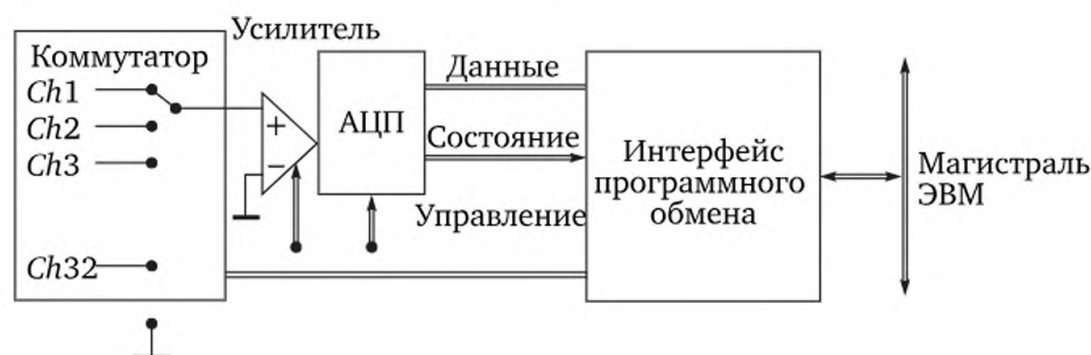


Рис. 5.16. Схема подключения АЦП к объекту автоматизации

Сигналы с датчиков объекта автоматизации поступают на входы коммутатора относительно общей земли. Такую схему (рис. 5.17) рекомендуется использовать, если источники сигналов соединены с общей землей.

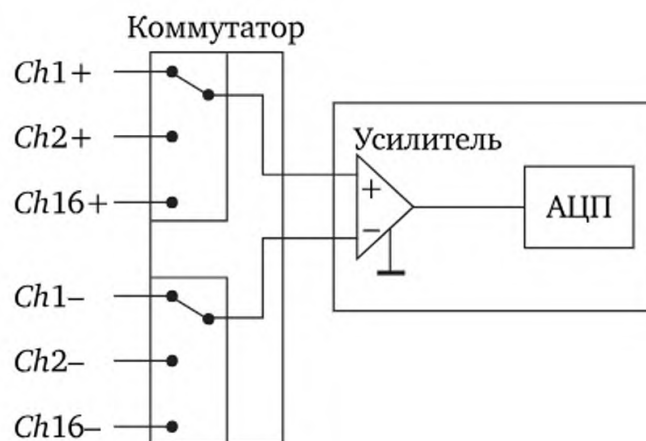


Рис. 5.17. Дифференциальная схема подключения сигналов датчиков ОА

Дифференциальную схему подключения сигналов датчиков необходимо использовать, если имеются «плавающие» источники сигнала, например батареи, термопары, трансформаторы или любые приборы, изолированные от общей земли. Дифференциальную схему подключения сигналов можно применять и с источниками сиг-

нала, соединенными с общей землей. Вообще говоря, такая схема подключения предпочтительна, поскольку она гасит помехи, передаваемые по земле, и синфазные шумовые сигналы.

Дифференциальную схему подключения рекомендуется использовать, если входные сигналы удовлетворяют следующим критериям:

- входные сигналы низкого уровня (менее 1 В);
- сигналы передаются по длинным, неэкранированным линиям через зашумленную среду;
- входные сигналы не связаны с общей землей.

Асимметричные системы измерения (с общей землей) рекомендуется использовать, когда входные сигналы не удовлетворяют указанным критериям.

Технические характеристики АЦП, усилителя, коммутатора:

- число двоичных разрядов кода АЦП $n = 12$;
- диапазон измерения входного сигнала U_x может устанавливаться программно: $U_x = \pm 5,12 \text{ В}, \pm 2,56 \text{ В}, \pm 1,024 \text{ В}$;
- разрешающая способность $\Delta U_1 = 2,5 \text{ мВ}, \Delta U_2 = 1,25 \text{ мВ}, \Delta U_3 = 0,5 \text{ мВ}$;
- коэффициент усиления усилителя $K_{yc} = 1, 2, 5$;
- максимальное время преобразования АЦП $T_{пр} = 1,7 \text{ мкс}$;
- входное сопротивление усилителя $R_x = 2 \text{ МОм}$;
- время переключения канала коммутатора $T_{ком} = 4 \text{ мкс}$;
- запуск АЦП программный.

Программная модель интерфейса обмена данными по готовности ВУ включает четыре регистра:

- 1) данных АЦП;
- 2) управления АЦП, усилителем, мультиплексором;
- 3) состояния АЦП, таймера;
- 4) запуска АЦП.

Регистр данных АЦП: 12-разрядный (относительный адрес «0»), доступен ЦП для чтения. После запуска АЦП на измерение и окончания преобразования напряжения в цифровой код последний передается в РД и сохраняется в нем до следующего запуска. Разряды РД — $D0—D11$ содержат код числа, пропорциональный входному напряжению в соответствии с таблицей:

Код	Диапазон ($\pm 5,12$) В	Диапазон ($\pm 2,56$) В	Диапазон ($\pm 1,024$) В
0	$-5,12$	$-2,56$	$-1,024$
2048	0	0	0
4095	$5,12 - \Delta U_1$	$2,56 - \Delta U_2$	$1,024 - \Delta U_3$

Аналого-цифровой преобразователь не вычисляет конечное значение сигнала (например, напряжение в вольтах). Он передает код,

пропорциональный напряжению в приложение пользователя. Задача вычисления значения сигнала отводится ПО, которое и вычисляет результат, в зависимости от решаемой задачи. Например, при измерении температуры с помощью термопары нас интересует величина температуры в градусах Цельсия или Кельвина. Таким образом, одно и то же устройство может выполнять множество измерений, просто изменяя приложение, которое читает данные.

По коду нельзя восстановить точное значение напряжения на входе АЦП U_x . Можно определить лишь округленное значение $U_{x\text{ кв}}$ из выражения

$$U_{x\text{ кв}} = n \cdot \Delta U,$$

где n — код на входе регистра данных АЦП. Максимальная погрешность измерения U_x от влияния квантования составит $|U_x - U_{x\text{ кв}}| \leq \Delta U/2$.

Если квантователь АЦП имеет характеристику, отличную от приведенной, последнее выражение будет изменяться.

Для преобразования кода АЦП платы L-154 в напряжение необходимо использовать следующее выражение:

$$U_{x\text{ кв}} = \Delta U \cdot (n - 2048),$$

где $U_{x\text{ кв}}$ — напряжение входного сигнала, округленное АЦП; ΔU — разрешающая способность, различная для различных диапазонов измерения; n — цифровой код на выходе АЦП, число в диапазоне от 0 до $2^{12} - 1 = 4095$.

Регистр управления (РУ) восьмиразрядный (относительный адрес «+2») предназначен для установки номера канала коммутатора, режима подключения входных сигналов и диапазона их измерения (коэффициента усиления). Регистр управления доступен ЦП для записи.

Формат регистра управления:

Бит	7	6	5	4	3	2	1	0
Обозначение	$U2$	$U1$	$M32$	$C4$	$C3$	$C2$	$C1$	$C0$

Здесь $U2, U1$ — диапазон измерения входного сигнала (управляется коэффициентом усиления измерительного усилителя): 1,1 — $\pm 5,12$ В, 1,0 — $\pm 2,56$ В, 0,1 — $\pm 1,024$ В, 0,0 — запрещено; $M32$ — режим подключения входного сигнала: $M32 = 1$ — 32-канальный режим с общей землей, $M32 = 0$ — 16-канальный дифференциальный режим; $C4—C0$ — номер канала коммутатора, подключенного к входу АЦП: 00000 — канал 1, 00001 — канал 2, ..., 11111 — канал 32. При дифференциальном подключении $C4 = 0$.

После переключения канала коммутатора нельзя сразу подавать команду «Запуск АЦП». Необходимо организовать задержку на время переключения канала ≈ 4 мкс. Для ускорения процесса многоканального ввода можно переустанавливать номер канала сразу после запуска АЦП. После того как АЦП запускается на измерение, срабатывает внутреннее устройство выборки-хранения (УВХ), в котором запоминается значение аналогового сигнала на момент запуска.

Регистр состояния восьмиразрядный (относительный адрес «+2») указывает состояние АЦП и счетчиков-таймера, ЦП регистр состояния доступен для чтения.

Формат регистра состояния:

Бит	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Значение	1	1	1	1	Состояние АЦП	T2	T1	T0

После запуска АЦП на измерение, бит состояние АЦП устанавливается в единицу на время выполнения преобразования ($\approx 1,7$ мкс) и сбрасывается по его окончании. При проверке готовности данных после запуска АЦП необходимо дождаться нулевого значения бита состояния.

Регистр запуска АЦП восьмиразрядный (относительный адрес «+4»), ЦП регистр доступен для записи. Запись произвольного значения в указанный регистр, запускает АЦП на измерение входного сигнала.

Алгоритм одноканальных измерений входного сигнала:

- 1) установка режима измерения: номера канала, режима подключения входного сигнала, диапазона измерения;
- 2) задержка на время переключения канала мультиплексора;
- 3) однократное измерение входного сигнала: запуск АЦП на измерение, проверка и ожидание окончания преобразования, чтение данных из РД АЦП;
- 4) преобразование кода АЦП в значение входного сигнала;
- 5) представление результатов измерения в цифровой или аналоговой форме.

При многократных измерениях в выбранном канале, можно повторять пункты 3—5 алгоритма, при этом задержка на время переключения канала появляется только при начальном запуске системы на измерения.

Алгоритм многоканальных измерений входного сигнала:

- 1) установка режима измерения в начальном выбранном канале: установка номера канала коммутатора, режима подключения входного сигнала, коэффициента усиления АЦП;
- 2) задержка на время переключения канала мультиплексора;
- 3) запуск АЦП на измерение;
- 4) установка режима измерения в следующем канале (номера канала, режима подключения входного сигнала, диапазона измерения).

ния). Обратите внимание: измерение в предыдущем канале не завершено и данные из него не считаны;

5) проверка и ожидание окончания измерения в предыдущем канале;

6) чтение данных из РД АЦП;

7) преобразование кода АЦП в значение входного сигнала;

8) представление результатов измерения в цифровой или аналоговой форме.

При многоканальных измерениях задержка на время переключения канала мультиплексора исчезает, так как установка параметров измерения в следующем канале совпадает по времени с выполнением измерения и чтением данных в предыдущем канале.

Считается, что инструментальные драйверы — ключевой фактор функционирования системы. Инструментальный драйвер — набор процедур, которые выполняют команды, необходимые для функционирования аппаратных средств системы. Инструментальные драйверы реализуют управление приборами и, как правило, отделены от другого кода. Пример: реализация алгоритма измерения входного напряжения по готовности АЦП.

Рассмотрим методику программирования обмена данными в среде программирования *Borland Pascal* на примере преобразования аналогового сигнала в цифровой код и его последующего ввода в ЭВМ с помощью описанного выше АЦП.

Задача: измерить напряжение на входе 1 канала мультиплексора АЦП, лежащее в диапазоне 1,0 В, при дифференциальном подключении источника сигнала:

```
Program Demo_Read_ADC;
var i: integer; U: of integer;

Procedure wait (i:word); {Задержка ~ i микросекунд.}
var j: word; begin for j:=1 to i do; end;

Begin
Port[$302]:=$40; {Дифференциальный режим 1 канал, усиление 5.}
Wait (4);
{После установки режима измерения необходима задержка  $\geq 4$  мкс.
Значение параметра процедуры Wait определяется в Лабораторном
эксперименте.}
Port[$304]:=0;
{Запуск АЦП. Сразу после запуска АЦП можно переключать канал
коммутатора при многоканальных измерениях сигналов.}
Asm Nop End;
while (Port [$302] >= $F8) do;
{Ожидание конца преобразования.}
U:= PortW [$300]; {Чтение кода данных из РД АЦП.}
Writeln ('Величина напряжения на входе 1 канала = ',
(U - 2048) * 0.5, '[мВ]');
{Преобразование данных и представление в цифровом виде
на экране монитора.}
End.
```

5.4.2.3. Программные средства реализации методики обмена данными между электронно-вычислительной машиной и внешним устройством по готовности

Проверка, установка и сброс отдельных разрядов регистров ВУ. При программировании операций обмена часто необходимо выполнять манипуляции с отдельными битами регистров ВУ. В большинстве случаев для чтения или изменения содержимого отдельных битов регистров ВУ достаточно применить одну из трех логических операций: «И», «ИЛИ» и «НЕ».

Среда программирования *Borland Pascal* допускает применение этих операций к целым переменным побитно. С целыми переменными эти операции выполняются столько раз, сколько бит содержит переменная, т. е. по одному разу для каждого бита. Операция «ИЛИ» проверяет одноименные биты двух целых переменных и, если бит установлен хотя бы в одной переменной, то он устанавливается и в результате. Операция «И» устанавливает в «1» бит результата, если оба бита операндов были установлены. Операция «НЕ» сбрасывает биты, ранее установленные в «1», и устанавливает биты, ранее сброшенные в «0». Операция «ИЛИ» применяется для установки битов в ячейке ОЗУ или регистре ВУ.

Для установки битов, операция «ИЛИ» выполняется над содержимым регистра и слова, у которого установлены только те биты, которые необходимо установить в регистре. Установка бита (0) 1010 1010 ИЛИ 0000 0001 = 1010 1011.

Операция «И» применяется для проверки или для сброса отдельных разрядов в ячейке ОЗУ или в регистре ВУ. Для сброса одного или более битов операция «И» выполняется над содержимым регистра, и слова у которого установлены поступают все биты, кроме сбрасываемых.

Необходимо сбросить бит (7) 1010 1010 И 0111 1111 = 0010 1010. Все биты кроме бита 7 вспомогательного слова установлены в 1 до начала операции. Операция сбрасывает бит 7, не изменяя значения остальных бит.

Для проверки отдельных битов в регистре ВУ необходимо выполнить операцию «И» над содержимым регистра и слова данных у которого сброшены все биты, кроме тестируемых битов. Проверяется бит (7), который находится в состоянии 1: 1010 1010 И 1000 0000 = 1000 0000. При выполнении операции все биты, кроме бита 7 маскируются и результат показывает в каком состоянии находился тестируемый бит.

Операции установки или сброса отдельных битов выполняются следующей последовательностью команд ЦП:

- чтение регистра или ячейки памяти;
- выполнение соответствующей операции;
- запись результата по прежнему адресу.

5.4.3. Обмен данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами с прерыванием текущей программы

Идея метода обмена данными с прерыванием программы заключается в том, что для обслуживания ВУ, процессор прерывает выполнение текущей программы. Обмен данными с прерыванием программы может применяться (как и обмен по готовности) для ВУ, имеющих любое быстроедействие. Однако такой метод обычно используется при работе с низкоскоростными устройствами или, если заранее неизвестно, какие ВУ и в какой момент времени потребуются обслуживать.

Невозможно заранее вставить в программу соответствующие команды. В этой ситуации единственно возможный способ обслуживания таких устройств — прерывание текущей программы для выполнения операций обмена данными с требующим обслуживания ВУ под управлением другой программы. Таким образом, обмен с прерыванием программы устраняет основной недостаток метода обмена данными по готовности — ожидание момента готовности ВУ. Это главное преимущество метода обмена данными с прерыванием программы.

Программа обслуживания ВУ в режиме прерывания называется *оперативной*.

Характерные черты (отличительные особенности) рассматриваемого метода программного обмена данными между ЭВМ и ВУ:

- 1) обмен инициируется внешним устройством. В предыдущих методах обмен инициировался ЦП;
- 2) каждый тип устройства, использующий обмен с прерыванием, должен иметь свою уникальную программу обслуживания. Прерывания допускаются только между отдельными командами, выполняемой ЦП программы (элементарные ассемблерные команды);
- 3) ЦП имеет средства полной блокировки прерываний ВУ.

Центральный процессор может производить вычисления по некоторой программе, не связанной с обменом данными с ВУ (рис. 5.18). Эту программу называют основной или фоновой. Для сигнализации о необходимости обслуживания ВУ посылают процессору сигнал запрос на прерывание текущей программы (ЗП). Сигнал ЗП (или запрос на обслуживание) появляется асинхронно по отношению к действиям ЦП, и управлять его появлением программа не может. Заранее неизвестно, в какой точке программы и какие ВУ инициируют обмен данными. Сигнал ЗП заставляет ЦП отложить исполнение основной программы и перейти к выполнению оперативной программы обслуживания ВУ. После завершения программы обслуживания ВУ необходимо возобновить выполнение прерванной программы с того места, в котором произошло прерывание.

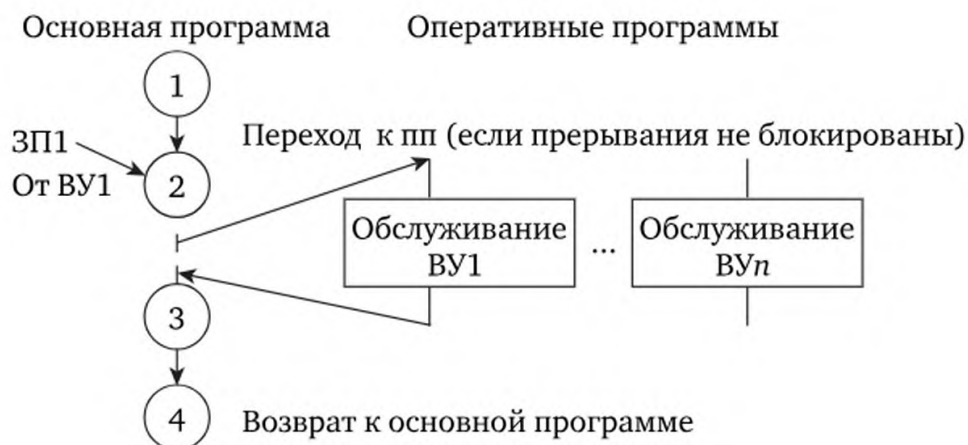


Рис. 5.18. Блок-схема алгоритма взаимодействия ВУ и ЦП при обмене данными с прерыванием текущей программы

Рассмотрим последовательность действий ЦП и ВУ при обмене данными в режиме прерывания текущей программы. Внешнее устройство как инициатор обмена данными при готовности к обмену посылает сигнал ЗП в ЦП через свой интерфейс. Таким образом, ВУ сигналом ЗП инициирует обмен данными.

Центральный процессор с получением сигнала ЗП последовательно выполняет следующие действия:

- 1) сохраняет информацию о своем текущем состоянии;
- 2) идентифицирует ВУ, от которого поступил сигнал ЗП;
- 3) переходит на оперативную программу обслуживания ВУ и выполняет обслуживание ВУ под управлением этой программы;
- 4) восстанавливает свое первоначальное состояние и возобновляет работу прерванной программы.

В первом из перечисленных шагов (сохранение информации о состоянии ЦП) под состоянием ЦП подразумевается:

- 1) содержимое счетчика команд (СК) и регистра состояния процессора (РСП). Сохранение СК и РСП необходимо для последующего возобновления прерванной программы, поскольку СК содержат адрес очередной команды основной (текущей) программы, РСП содержит признаки результатов выполнения арифметической или логической операции предыдущей команды основной (текущей) программы;

- 2) содержимое тех внутренних регистров ЦП, которые будут модифицированы в результате выполнения оперативной программы.

Область памяти, служащая для хранения информации о состоянии процессора, называется стеком. Центральный процессор, как правило, автоматически (с помощью своих аппаратных средств) заносит в стек содержимое СК и РСП при возникновении прерывания. Для правильного продолжения прерванной программы необходимо предусмотреть сохранение остальных регистров ЦП в оперативной программе.

В ЭВМ семейства *Macintosh* процессор своими аппаратными средствами сохраняет содержимое регистров: *R7* — счетчик команд, *PSW* — слово состояния процессора.

В ЭВМ семейства *IBM PC* процессор сохраняет: *CS* (*Code Segment*) — регистр сегмента команд, *IP* (*Instruction Pointer*) — указатель команд, *Flags* — регистр флагов. При этом сбрасываются флаги *IF* и *TF*, запрещающие прерывание оперативной программы.

Стек в ЭВМ семейства *IBM PC* начинается с максимально доступного основной программе адреса ОЗУ и может достигать 64 Кбайт (в реальном режиме работы ЦП). Стек всегда растет в сторону меньших адресов.

Второй шаг — идентификация ВУ может выполняться следующими способами:

- 1) опрос ВУ;
- 2) по вектору прерываний;
- 3) комбинированный способ (комбинация первых двух).

Идентификация ВУ путем опроса выполняется (в основном) с помощью программных средств (рис. 5.19). Здесь осуществляется последовательный опрос ВУ, пока не обнаружится то, которое запрашивает прерывание. Далее осуществляется переход на соответствующую программу, под управлением которой и выполняется обмен данными.

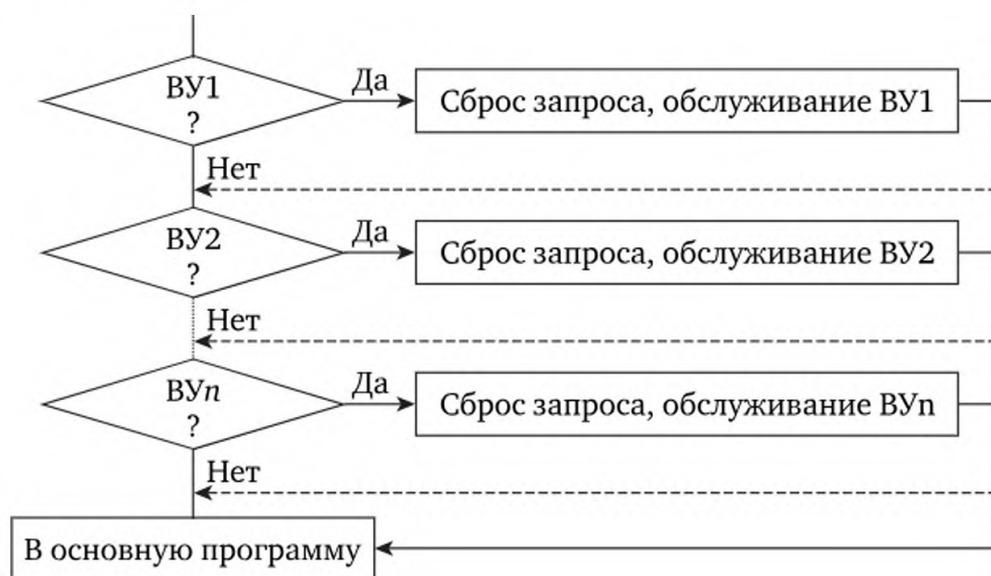


Рис. 5.19. Блок-схема алгоритма идентификации ВУ путем опроса

Центральный процессор опрашивает ВУ в той последовательности, как это заложено в программе опроса. При таком способе идентификации приоритет обслуживания каждого ВУ определяется его местом в программе последовательности опроса. Наивысший приоритет обслуживания имеет ВУ1, которое всегда обслуживается первым, самый низкий — ВУn, которое обслуживается последним.

По завершении обслуживания ВУ может быть запрограммировано одно из следующих действий:

1) управление возвращается в основную программу без проверки запросов остальных устройств (показано сплошной линией). Здесь гарантируется обязательная проверка в каждом цикле опроса ВУ с высокими приоритетами;

2) управление возвращается к программе опроса, т. е. в точку проверки запроса прерывания следующего ВУ (на рис. 5.19 показано пунктирной линией).

Этот способ гарантирует проверку в каждом цикле всех ВУ.

Конкретная реализация зависит от конфигурации аппаратных средств. Если ВУ имеют существенно различающиеся приоритеты обслуживания, то применяется первый способ идентификации источников запросов (т. е. возврат в основную программу после обслуживания самого приоритетного устройства). Если ВУ имеют примерно одинаковые приоритеты обслуживания, то второй (т. е. возврат к программе опроса).

Основное достоинство метода идентификации ВУ путем опроса — простота реализации, не требующая дополнительных аппаратных средств. Недостаток метода — в системах с большим числом ВУ, время, затрачиваемое на идентификацию ВУ, может быть значительным.

Идентификация по вектору позволяет существенно уменьшить время реакции системы на запрос прерывания, за счет аппаратной реализации перехода к требуемой оперативной программе.

Когда ЦП принимает ЗП от ВУ, он посылает внешним устройствам сигнал разрешение прерывания (РП). Реагировать на сигнал РП будет то ВУ, которое послало сигнал ЗП. По сигналу РП, устройство, затребовавшее прерывание, передает в ЦП (по шине данных) некоторый, уникальный для каждого ВУ код, называемый *адрес вектора прерывания*.

Вектором прерывания называется информация, хранящаяся в непрерывной определенной области оперативной памяти, указывающая адрес программы, которую требуется выполнить для обслуживания ВУ (адрес оперативной программы). Обычно вектор прерывания занимает несколько байт в непрерывной области ОЗУ.

Адрес вектора прерывания (АВП) — это начальный адрес оперативной памяти, где хранится вектор прерывания. Адрес вектора прерывания — адрес младшего байта ОЗУ, где хранится вектор прерывания. В ЭВМ семейства *Macintosh* вектор прерываний занимает два (16-разрядных) слова. В первом слове хранится начальный адрес программы обслуживания ВУ, во втором — новое слово состояния процессора:

Адрес 1 команды оперативной программы обслуживания ВУ
Слово состояния процессора. P4 P2 P1 — приоритет обслуживания ВУ

Под векторы прерываний отводится 256 байт ОЗУ, начиная с адреса = 0. Адрес вектора прерывания передается в виде 1 байта восьмиразрядного слова (в этой области памяти можно разместить 64 вектора прерываний).

В ЭВМ семейства *IBM PC* под векторы прерываний отводится 1024 байта оперативной памяти в диапазоне адресов $0 \dots 3FF_{16}$. Каждый вектор прерывания занимает 4 байта или два 16-разрядных слова, что позволяет разместить 256 векторов прерывания ВУ в указанной области.

Вектор прерывания содержит начальный адрес оперативной программы обслуживания ВУ, который состоит:

- из адреса смещения первой команды оперативной программы — 2 байта;
- адреса сегмента команд (где хранится программа) — 2 байта.

Центральный процессор в *IBM PC* получает от ВУ не адрес вектора прерываний, а код номера типа прерывания — число в диапазоне 0—255, по которому процессор *IBM PC* идентифицирует ВУ затребовавшее прерывание программы. Код номера типа умножается ЦП на 4, а полученный результат используется в качестве указателя ячейки памяти — адреса вектора прерывания.

Пример АВП: 0000:0000 — ВУ0, 0000:0004h — ВУ1,
0000:0008h — ВУ2, ..., 0000:03FCh — ВУ255.

При комбинированном способе идентификации ВУ несколько ВУ могут иметь одинаковые адреса векторов прерываний, т. е. обслуживаются одной программой, поэтому идентификация по вектору дополняется программой опроса внутри этих ВУ.

Третий шаг — переход на программу обслуживания ВУ и обмен данными выполняется процессором путем загрузки содержимого вектора прерывания в регистры ЦП и, таким образом, — к переходу к программе обслуживания ВУ.

Центральный процессор семейства *Macintosh* считывает первое слово вектора прерывания в СК ($R7$), второе — в РСП (PSW) и, таким образом, инициирует программу обслуживания данного ВУ. Центральный процессор семейства *IBM PC* считывает содержимое вектора прерывания в счетчик команд процессора (регистры IP , CS), в регистре флагов ($Flags$) сбрасывает флаги разрешения прерываний ($IF = 0$) и флаг трассировки ($TF = 0$) и начинает выполнение последовательности команд оперативной программы. При сброшенном флаге $IF = 0$ прерывания ВУ невозможны, следовательно, ЦП полностью блокирует новые прерывания.

Оперативная программа обслуживания устройства в начале выполнения должна сохранять состояние тех внутренних регистров процессора, содержимое которых модифицируется в результате ее выполнения, а по завершении восстанавливать прежние значения регистров.

Последний шаг — возврат в фоновую программу — требует выборки из стека и загрузки в регистры процессора прежних значений СК и РСП, что позволяет продолжить выполнение прерванной программы. Эти действия инициируются командой возврат из прерывания (*RTI* в *Macintosh*, *IRET* в *IBM PC*), которой должна заканчиваться каждая оперативная программа обслуживания прерываний.

Способ обмена данными с прерыванием программы (рис. 5.20) особенно удобен при работе с ВУ с низким быстродействием, а также когда момент передачи данных непредсказуем.

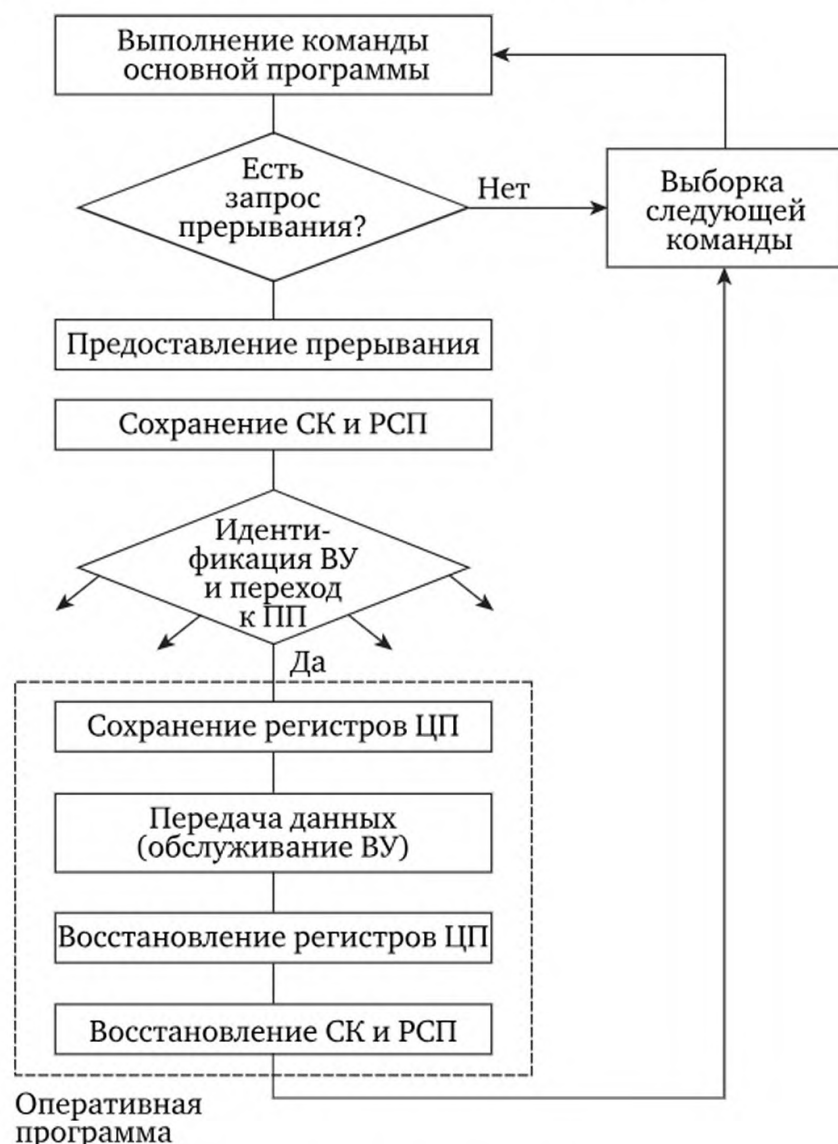


Рис. 5.20. Блок-схема алгоритма обслуживания ВУ с прерыванием программы

Время реакции системы на ЗП, т. е. максимальное время между запросом прерывания и выборкой первой команды оперативной программы определяется:

1) временем выполнения самой длинной команды основной программы. Если ЗП поступит в момент выполнения такой коман-

ды, то процессор выполнит ее до конца, прежде чем начнет обслуживание прерывания;

2) временем идентификации ВУ. В случае идентификации по вектору это время существенно меньше времени идентификации путем опроса;

3) временем записи в стек содержимого внутренних регистров ЦП.

Практически все стандартные периферийные устройства ЭВМ используют обмен с прерыванием программы (клавиатура, мышь, принтер и т. д.). Время реакции системы на ЗП больше времени реакции системы на сигнал готовности (недостаток метода). Предпочтительно использовать обмен данными с прерыванием текущей программы для низкоскоростных ВУ.

5.4.3.1. Механизм приоритетов, вложенные прерывания

Аппаратные прерывания возникают независимо друг от друга, а следовательно, могут появиться одновременно несколько запросов прерываний. Система в такой ситуации всегда должна отдавать предпочтение самому приоритетному устройству, откладывая обработку остальных прерываний.

Во время обслуживания какого-либо ВУ могут поступать запросы прерываний от устройств с большими приоритетами. Если запретить прерывания от высокоприоритетных быстродействующих ВУ во время обслуживания ВУ с низким приоритетом, это может привести к потере запросов от них, так как они не могут долго дожидаться обслуживания. Чтобы система могла решить какое устройство обслуживать в первую очередь, существует механизм приоритетов, который указывает системе, какое ВУ обслуживать в каждый момент времени.

С помощью механизма приоритетов выполняются следующие действия:

- фиксируется приоритет любой выполняемой ЦП программы;
- идентифицируется ЗП от ВУ с максимальным приоритетом;
- разрешается прерывание текущей программы при возникновении ЗП с приоритетом большим, чем приоритет выполняемой программы.

Прерывание программ обслуживания прерываний называется *вложением прерываний*. Центральный процессор в современных ЭВМ обычно работает в режиме вложенных прерываний (рис. 5.21).

Пусть имеются четыре ВУ, приоритеты которых возрастают с уменьшением номера ВУ. Основная программа имеет самый низкий приоритет обслуживания и выполняется всегда, если нет ЗП от ВУ.

До момента t_1 выполняется основная программа (Осн. прогр.) — отсутствуют ЗП от ВУ:

t_1 — появляется ЗП от ВУ4, ЦП переходит к обслуживанию ВУ4;

t_2 — появляется ЗП от ВУ3, ЦП переходит к обслуживанию ВУ3;

t_3 — появляется ЗП от ВУ2, ЦП переходит к обслуживанию ВУ2;
 t_4 — заканчивается обслуживание ВУ2, ЦП переходит к обслуживанию ВУ3;
 t_5 — появляется ЗП от ВУ1, ЦП переходит к обслуживанию ВУ1 и не прерывается;
 t_6 — заканчивается обслуживание ВУ1, ЦП переходит к обслуживанию ВУ3;
 t_7 — заканчивается обслуживание ВУ3, ЦП переходит к обслуживанию ВУ4;
 t_8 — заканчивается обслуживание ВУ4 ЦП переходит к выполнению основной программы.

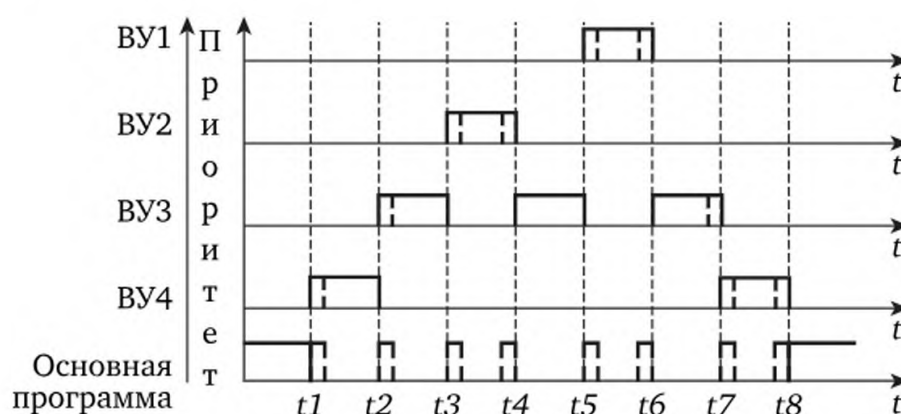


Рис. 5.21. Временная диаграмма работы ЦП в режиме вложенных прерываний

При большой частоте поступления ЗП, ЦП работает неэффективно, так как значительная часть процессорного времени расходуется на процедуры перехода к ПОП (т. е. идентификацию ВУ и сохранения регистров) и возврата в прерванную программу (т. е. восстановление регистров ЦП). Это второй недостаток метода обмена данными с прерыванием программы. Поэтому в системах реального времени всегда стремятся уменьшить частоту прерываний, например, включением в состав аппаратной части ВУ буферных ЗУ для предварительного накопления информации.

При присвоении приоритетов ВУ учитывают следующие условия:

- чем выше быстродействие ВУ, тем более высокий приоритет следует ему присваивать;
- наивысший приоритет должен присваиваться ВУ, данные от которого не могут быть восстановлены.

Для некоторых критических участков программы, результат выполнения которых зависит от времени их выполнения, следует указывать максимальный приоритет обслуживания или вообще запрещать любые прерывания ВУ. В ЭВМ на основе единого магистрального канала приоритет программы обслуживания ВУ указывается программистом во втором слове вектора прерывания.

В ЭВМ на основе изолированных каналов обмена приоритеты ЗП от ВУ определяются специальной БИС (большая интегральная схема) программируемого контроллера прерываний, т. е. дополнительными аппаратными средствами ЭВМ.

5.4.3.2. Принципы работы интерфейса обмена данными с прерыванием программы

Интерфейс обмена данными с прерыванием программы позволяет реализовать и все ранее рассмотренные способы программного обмена данными (безусловный, по готовности ВУ), следовательно: интерфейс обмена данными с прерыванием программы включает все компоненты интерфейса обмена данными по готовности ВУ, а именно:

- регистр(ы) данных;
- регистр(ы) состояния ВУ;
- регистр(ы) управления ВУ.

Рассмотрим дополнительные элементы интерфейса обмена данными с прерыванием текущей программы.

1. Схема формирования ЗП. Для формирования ЗП в РУ интерфейсом ВУ должен быть триггер флага разрешения прерываний (ФРП) (рис. 5.22). Для разрешения ВУ выполнять обмен данными с прерыванием программы необходимо в фоновой программе установить ФРП в «1». Фоновая программа может разрешать или запрещать (либо маскировать) прерывания, устанавливая или сбрасывая ФРП. В РС интерфейса ВУ имеется ФГ ВУ, который может устанавливать в «1» только ВУ при готовности к обмену данными. Запрос на прерывание на шине управления ЭВМ появляется, когда одновременно и ВУ установит в «1» ФГ, и ЦП установит в «1» ФРП.

Таким образом, ВУ должно быть готово к обмену данными, а ЦП (т. е. фоновая программа) должен разрешить ВУ обмен с прерыванием. Сигналы с выходов обоих триггеров объединяются с помощью логической схемы «2И», а выход схемы соединяется с линией ЗП магистрали ЭВМ. Если сбросить в ноль ФГ или ФРП, сигнал на линии ЗП будет отсутствовать.

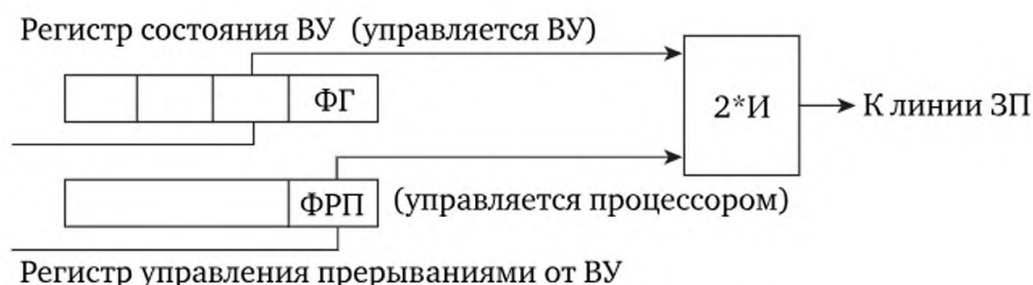


Рис. 5.22. Схема формирования ЗП от ВУ

2. Схема учета приоритетов, основное назначение которой — указать ЦП, должен ли он реагировать на ЗП от ВУ и какое ВУ обслу-

живать в каждый момент времени. Схема учета приоритетов должна блокировать ЗП от внешних устройств с низкими приоритетами, если обслуживается высокоприоритетное устройство.

3. Схема формирования адреса вектора прерывания должна передавать ЦП некоторый, уникальный для каждого ВУ код, соответствующий адресу вектора прерывания (АВП) для идентификации ВУ.

Техническая реализация второго и третьего компонентов интерфейса различна для ЭВМ на основе единого магистрального канала и ЭВМ на основе изолированных магистральных каналов обмена данными.

5.4.3.3. Техническая реализация интерфейса обмена данными с прерыванием программы

Существуют два варианта технической реализации схемы учета приоритетов и схемы формирования адреса вектора прерываний интерфейса обмена данными с прерыванием программы: приоритетная цепочка и программируемая логика управления приоритетами прерываний. Первый вариант реализован в ЭВМ на основе единого магистрального канала (семейство *Macintosh*), второй — в ЭВМ с изолированными магистральными каналами обмена (семейство *IBM*).

Техническая реализация многоуровневых векторных прерываний в ЭВМ на основе единого магистрального канала обмена данными (приоритетная цепочка). Интерфейсы нескольких ВУ могут быть подсоединены параллельно к одной линии ЗП магистрали ЭВМ таким образом, что все запросы поступают по одной и той же линии. Для идентификации источника запроса, ЦП посылает сигнал разрешения прерывания (РП) в интерфейсы. Сигнал РП поступает от ЦП к ВУ последовательно по линии РП (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Блок-схема алгоритма идентификации источника запроса прерывания в ЭВМ на основе единого магистрального канала

Вначале сигнал РП поступает на ВУ1 (расположенное физически ближе к ЦП). Если ВУ1 не требовало прерывания программы, его схема учета приоритетов пропускает сигнал РП к следующему ВУ и т. д.

В первом устройстве в цепочке (ближайшем к ЦП), которое посылало ЗП:

- схема учета приоритетов поглощает сигнал РП;
- схема формирования АВП выдает на ШД адрес вектора прерывания и сбрасывает ТРП в регистре управления интерфейсом.

Таким образом, схема учета приоритетов ВУ блокирует сигнал РП, если ВУ требует прерывание программы, или пропускает его к следующему ВУ, если данное ВУ не устанавливало сигнал ЗП процессору. Устройства, расположенные физически ближе к ЦП, имеют больший приоритет обслуживания.

Адрес вектора прерывания обычно представляет собой восьмибитовое слово, которое поступает на ШД с формирователя адреса вектора прерываний (ФАВП) интерфейса ВУ. Поскольку ВП занимает 4 байта в области адресов 0 .. 255, то имеется возможность передать 64 различных АВП — 0, 4, 8, .. 252.

Формирователь адреса вектора прерываний представляет собой комбинационную схему, на вход которой поступает сигнал РП от ЦП, а с выхода на шину данных ЭВМ поступает определенная для данного ВУ комбинация «0» и «1». В ЭВМ на основе единого магистрального канала имеется несколько линий «ЗП — РП» и, следовательно, несколько приоритетных уровней прерываний. Это позволяет организовать многоуровневые вложенные векторные прерывания. Число линий «ЗП — РП» в разных моделях ЭВМ может меняться от 1 до 7. В большинстве ЭВМ имеются четыре приоритетных уровня (рис. 5.24).

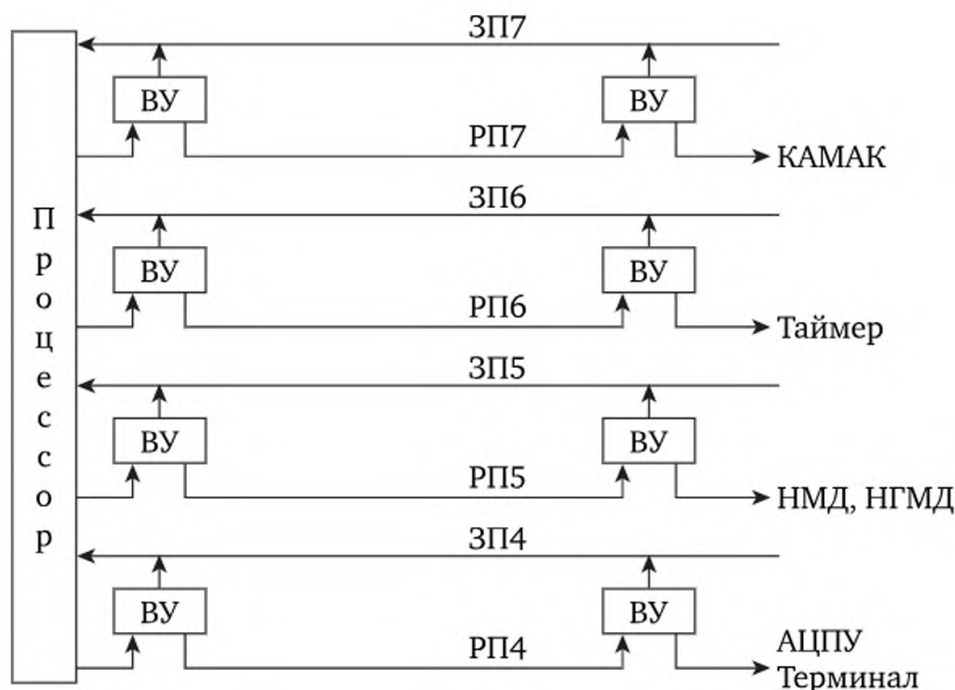


Рис. 5.24. Многоуровневая схема идентификации источника запроса прерывания

Количество ВУ, подключаемых к одной паре линий «ЗПк — РПк», не ограничено. Каждой паре линий «ЗПк — РПк» соответствует свой уровень приоритета обслуживания ВУ. Приоритеты линий фиксированы. Линия «ЗП7» имеет наивысший приоритет (7), а линия «ЗП1» имеет низший (1) приоритет обслуживания. Внешние устройства, подсоединенные к k -й линии, имеют k -й приоритет обслуживания.

При поступлении запроса по одной из линий «ЗП7 — ЗП1» процессор сравнивает приоритет линии с приоритетом, указанным в РСР. Если приоритет линии «ЗПк» выше приоритета процессора, то процессор выдает сигнал «РПк» по соответствующей линии и начинает исполнять процедуру прерывания. При равенстве приоритетов линии «ЗПк» и процессора прерывания программы не происходит. Линия «ЗПк» остается возбужденной, т. е. прерывание «ждет» очереди. Когда приоритет процессора станет ниже приоритета линии, процессор переходит к обслуживанию запроса с данной линии «ЗПк».

Разработчик АС имеет возможность подсоединить ВУ к любой линии ЗП. Программист имеет возможность присвоить оперативной программе обслуживания ВУ любой приоритет, указывая его в векторе прерывания. Однако обычно программа обслуживания прерывания имеет тот же приоритет, что и инициализирующее ее ВУ.

Основная особенность такого способа реализации прерываний — уровни приоритетов ВУ, и АВП устанавливаются аппаратными средствами интерфейса и не могут меняться в процессе работы системы.

Техническая реализация многоуровневых векторных прерываний в ЭВМ на основе изолированных каналов обмена данными (семейства *IBM PC*). В автоматизированных системах на основе ЭВМ с изолированными каналами обмена данными для управления прерываниями от ВУ используется программируемая логика управления приоритетами прерываний (ПЛУПП). В качестве ПЛУПП в ЭВМ семейства *IBM* применена типовая БИС программируемого контроллера прерываний (ПКП) *Intel 8259A*.

Технические характеристики ПКП:

- число приоритетных уровней запросов прерываний от внешних устройств — 8;
- число приоритетных уровней запросов прерываний может быть расширено до 64 путем каскадного соединения микросхем ПКП;
- корпус 28 pin (выводов микросхемы), питание +5 В, таймера нет.

В ЭВМ семейства *IBM AT* имеются два каскадно-включенных ПКП. Схемы учета приоритетов и схемы формирования АВП перенесены из интерфейсов ВУ в БИС ПКП. В интерфейсе осталась только схема формирования АВП.

Основное отличие ПЛУПП от приоритетной цепочки в том, что режим обслуживания запросов от ВУ, уровни приоритетов и АВП устанавливаются программным путем и могут быть изменены в процессе работы системы.

Программируемые режимы обслуживания ВУ:

1) вложенные прерывания. Каждому из восьми входов запросов прерываний $IR0 \dots IR7$ назначается фиксированный приоритет в порядке убывания, и запрос с большим приоритетом может прерывать обслуживание запросов с меньшими приоритетами. Иными словами запрос от входа IRi могут прерывать запросы от входов $IR0 \dots IR(i - 1)$;

2) круговой (циклический) приоритет. Как и в предыдущем случае, каждому входу $IR0 \dots IR7$ назначается определенный приоритет, но после появления запроса прерывания IRi и выполнения программы его обслуживания приоритеты изменяются в круговом порядке таким образом, что последний обслуженный вход IRi будет иметь низший приоритет. Если, например, обслужен запрос $IR4$, низший приоритет назначается $IR4$ и получается следующий порядок приоритетов: $IR5, IR6, IR7, IR0, IR1, IR2, IR3, IR4$;

3) адресуемые приоритеты. Режим аналогичен предыдущему, но допускает программное определение входа IRi , которому назначается низший приоритет;

4) режим опроса. В этом режиме прерывания процессора запрещаются, а требующее обслуживания ВУ определяется считыванием состояния контроллера;

5) незамаскированные запросы обслуживаются в порядке их поступления.

5.4.3.4. Схема подключения программируемого контроллера прерываний к системной шине и внешним устройствам

С одной стороны ПКП подключен к магистрали ВУ ЭВМ, с другой — к интерфейсам ВУ по следующей схеме (рис. 5.25). Эта схема позволяет понять, как ПКП взаимодействует с ЦП и ВУ.

Назначение выводов БИС ПКП:

- выводы $D7 \dots D0$ (входы-выходы) — двунаправленная шина данных служит для приема управляющей информации от ЦП и для передачи статусной информации в ЦП. Используются только восемь линий ШД ЭВМ. Это позволяет за цикл шины передать в ЦП номер типа прерываний (число в диапазоне от 0 до 255) и, следовательно, кодировать 256 различных ВП;

- вывод $A0$ (вход) — адресная линия используется для адресации регистров контроллера.

Для каждого контроллера в адресном пространстве ввода/вывода системы выделены два адреса ($A0 = 0, A0 = 1$).

- вывод $\sim CS$ (*chip select*) (вход) — выбор кристалла разрешает («0») или запрещает («1») связь контроллера с системной шиной. Этот вход обычно связан с шиной адреса посредством дешифратора адреса, который определяет базовый адрес ПКП в пространстве

адресов ввода-вывода процессора. Первый ПКП использует адреса 20h, 21h, второй — A0h, A1h;

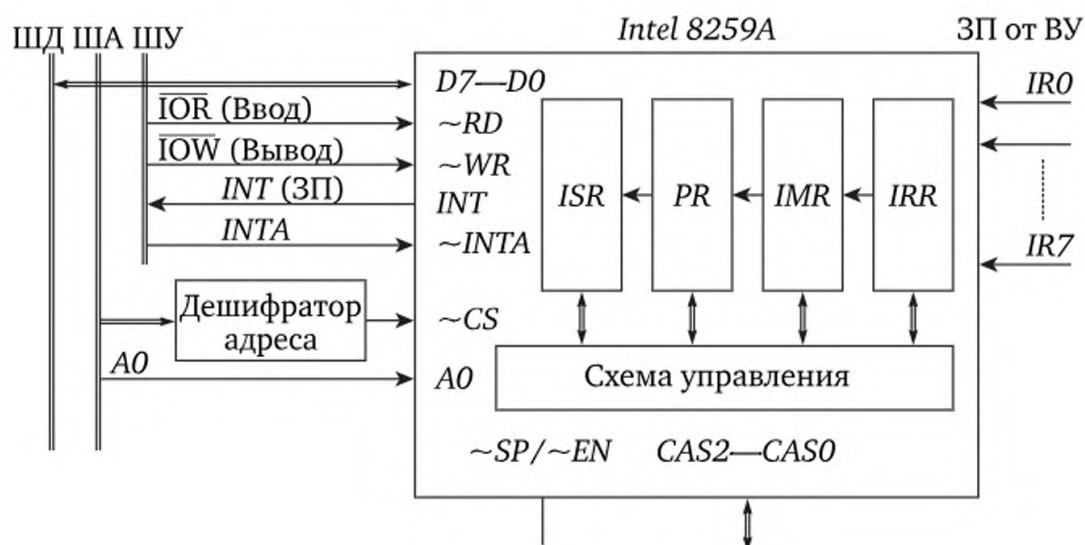


Рис. 5.25. Схема подключения ПКП к системной шине и внешним устройствам

- выходы $\sim RD$ (read), $\sim WR$ (write) (входы) — ввод, вывод используются для приема от ЦП сигналов управления: чтения (по линии IOR) или записи (по линии IOW) регистров контроллера;
- вывод INT (interrupt) (выход) — запрос прерывания программы ЦП служит для формирования соответствующего сигнала (по линии INTR);
- вывод $\sim INTA$ (interrupt acknowledge) (вход) — разрешение прерывания от ЦП (передается по линии с тем же названием);
- выходы CAS0 .. CAS2 (выходы для ведущего ПКП, входы для ведомых) — линии каскадирования при наличии нескольких контроллеров образуют локальную шину для идентификации ведущим ПКП конкретного ведомого;
- вывод $\sim SP/\sim EN$ (вход) — определяет, является контроллер ведущим ($\sim SP/\sim EN = 1$) или ведомым ($\sim SP/\sim EN = 0$);
- выходы IR0 .. IR7 (входы) — запросы прерываний от внешних устройств подключаются к интерфейсам ВУ.

В табл. 5.2 показано назначение входов запросов прерываний для первого ПКП (IR0 .. IR7) и второго ПКП (IR8 .. IR15) и номера типов прерываний.

Таблица 5.2

Аппаратные прерывания в порядке их приоритетов и назначения.

Вход	Номер типа	Назначение входа
IR0	8	Таймер
IR1	9	Клавиатура
IR2	Ah	Для каскадирования

Вход	Номер типа	Назначение входа
<i>IR8</i>	<i>70h</i>	Часы реального времени (AT)
<i>IR9</i>	<i>71h</i>	Программно переводится в <i>IR2</i> (AT)
<i>IR10</i>	<i>72h</i>	Зарезервировано (AT)
<i>IR11</i>	<i>73h</i>	Зарезервировано (AT)
<i>IR12</i>	<i>74h</i>	Зарезервировано (AT)
<i>IR13</i>	<i>75h</i>	Математический сопроцессор
<i>IR14</i>	<i>76h</i>	Контроллер НЖМД 1
<i>IR15</i>	<i>77h</i>	Контроллер НЖМД 2
<i>IR3</i>	<i>Bh</i>	COM2 (AT)
<i>IR4</i>	<i>Ch</i>	COM1 (AT)
<i>IR5</i>	<i>Dh</i>	LPT2 (AT)
<i>IR6</i>	<i>Eh</i>	Контроллер НГМД
<i>IR7</i>	<i>Fh</i>	LPT1

5.4.3.5. Функциональный состав и программная модель программируемого контроллера прерываний

Программируемый контроллер прерываний содержит следующие функциональные элементы (см. рис. 5.25):

- *IRR* (*Interrupt Request Register*) — регистр запросов прерываний;
- *IMR* (*Interrupt Mask Register*) — регистр масок прерываний;
- *ISR* (*Interrupt Service Register*) — регистр обслуживаемых запросов;
- *PR* (*Priority Resolver*) — шифратор приоритетов.

Все регистры восьмиразрядные. Регистр запросов прерываний *IRR*, фиксирует запросы на входах *IR0 .. IR7* от ВУ. К каждому входу можно подключать одно ВУ. Входные цепи сигналов *IRi* регистра *IRR* могут программироваться на восприятие фронта сигнала и сохранение его в разряде регистра *IRR* или уровня сигнала (в ЭВМ семейства *IBM* входные цепи регистра *IRR* программируются на восприятие фронта сигнала *IRi*).

Регистр масок прерываний *IMR* служит для маскирования/разрешения отдельных входов запросов прерываний *IRi*. Если какой-либо *i*-й бит регистра маски *IMi* установлен в «1», то запрос от соответствующего входа *IRi* регистра запросов будет запрещен. Сигнал *IRi* = 1 зафиксирован в регистре *IRR*, но установленный бит маски в регистре *IMR* не пропускает его в шифратор приоритетов.

Маскирование входа *IRi* с некоторым приоритетом не запрещает прерывания от входов, как с меньшими, так и большими приоритетами.

Регистр обслуживаемых запросов *ISR* хранит запросы, обслуживаемые процессором в текущий момент времени. На время обслуживания ЦП запроса *IRi* соответствующий разряд *ISi* регистра *ISR* устанавливается в единичное состояние, при этом блокируются прерывания от этого и всех других входов с меньшими приоритетами. Программируемый контроллер прерываний не может сам определить, когда заканчивает работу оперативная программа обслуживания ВУ. Следовательно, программа обслуживания прерывания при своем завершении или в процессе работы должна сбросить бит *ISi* в регистре *ISR* и тем самым разрешить прерывания от ВУ с низким приоритетом.

Шифратор приоритетов *PR* анализирует содержимое этих трех регистров и определяет, необходимо или нет генерировать сигнал *INT* запрос прерывания процессору. Таким, образом, шифратор приоритетов *PR* реализует схему учета приоритетов и формирования АВП.

Алгоритмы работы ПКП. Как любая программируемая интерфейсной БИС, ПКП до начала работы системы требуется начальная инициализация, так как после включения питания его состояние будет неопределенным. Начальная инициализация подразумевает установку всех параметров работы ПКП. Инициализация ПКП выполняется несколькими последовательными приказами, которые определяют:

- 1) количество ПКП в системе — один или несколько;
- 2) к каким входам ведущего ПКП подключены ведомые ПКП, а к каким ВУ;
- 3) адреса векторов прерываний (номера типов прерываний) которые будут соответствовать отдельным входам запросов *IRi*;
- 4) режим обслуживания запросов ВУ (вложенные приоритеты, циклически изменяемые приоритеты, адресуемые приоритеты и т. д.).

Инициализация ПКП выполняется командами записи приказов инициализации в регистры ПКП и не должна прерываться. Если инициализация не выполнена или выполнена не полностью, ПКП не будет реагировать на ЗП от ВУ. В ЭВМ семейства IBM инициализация выполняется BIOS (*Basic Input/Output System*), которая устанавливает:

- 1) режим вложенных прерываний;
- 2) адреса векторов прерываний, согласно приведенной ранее таблице;
- 3) определяет ПКП1 — ведущим, ПКП2 — ведомым (подключен к входу *IR2*).

В процессе работы системы повторная инициализация, как правило, не требуется.

5.4.3.6. Алгоритмы обслуживания прерываний

При появлении запроса прерывания от какого-то ВУ i на входе IRi , ПКП выполняет следующие действия по его обслуживанию:

1) запрос IRi фиксируется в регистре IRR — устанавливается в «1» соответствующий бит регистра ($IRi = 1$);

2) установленный в «1» бит IRi регистра IRR сравнивается с соответствующим битом IMi регистра IMR :

а) если бит $IMi = 1$, то запрос IRi не обрабатывается ПКП,

б) если бит IMi регистра маски IMR сброшен в ноль ($IMi = 0$), то запрос передается в шифратор приоритетов PR ;

3) шифратор приоритетов PR сравнивает приоритет полученного запроса с приоритетом запроса, обслуживаемого ЦП в текущий момент времени:

а) если в регистре ISR хотя бы один из битов обслуживаемых запросов ISi с большими приоритетами установлен в «1» (процессор обслуживает запрос с большим приоритетом), то дальнейшая обработка вновь полученного запроса откладывается до тех пор, пока не будут обслужены все запросы с большими приоритетами и сброшены в «0» все биты запросов с большими приоритетами,

б) если в регистре ISR биты запросов с большими приоритетами сброшены в ноль, формируется сигнал INT процессору;

4) ЦП проверяет состояние флага разрешения прерываний IF в регистре флагов ($Flags$):

а) если $IF = 0$, то ЦП не реагирует на запрос прерывания до момента, когда IF будет установлен в единицу,

б) если прерывания процессора разрешены (флаг разрешения прерываний в регистре флагов процессора установлен в единицу, $IF = 1$), то по завершении текущей команды, процессор сбрасывает флаги IF , TF и возвращает ПКП сигнал разрешения прерывания по линии $INTA$ в виде двух последовательных импульсов;

5) ПКП при действии первого импульса $INTA$ ($INTA1$):

а) запрещает сигналы ЗП на входах регистра IRR и регистр IRR игнорирует сигналы на входах IRi до второго импульса $INTA2$. Если в этот момент поступает сигнал ЗП от ВУ, то он теряется,

б) бит IRi сбрасывается в ноль ($IRi = 0$) (сигнал на входе IRi не сбрасывается). Бит ISi устанавливается в единицу ($ISi = 1$);

6) ПКП при действии второго импульса $INTA$:

а) передает на линии $D7 \dots D0$ номер типа прерывания,

б) разрешает запросы на входах $IR0 \dots IR7$. Установка бита $ISi = 1$ в регистре ISR блокирует прерывания от этого входа (IRi) и всех других входов с меньшими приоритетами до момента сброса бита ISi оперативной программой;

7) ЦП считывает номер типа прерывания с ШД и приступает к исполнению процедуры прерывания в соответствии с рассмотренным ранее алгоритмом.

Программируемый контроллер прерываний реализует данный алгоритм для любого режима обслуживания прерываний от ВУ (вложенных прерываний, адресуемых или циклических приоритетов). При обслуживании какого-то ВУ могут поступать ЗП от ВУ с большими приоритетами, и ПКП формирует сигнал *INT* в ЦП, однако ЦП не будет реагировать на этот сигнал, так как сброшен $IF = 0$ в регистре флагов ЦП. Следовательно, любая оперативная программа должна устанавливать $IF = 1$, как только это становится возможным, чтобы восстановить режим вложенных прерываний и не потерять ЗП от ВУ с высоким приоритетом.

Таким образом, оперативная программа должна:

- 1) сохранять внутренние регистры ЦП в начале работы и восстанавливать их при завершении;
- 2) устанавливать $IF = 1$ сохраняя режим вложенных прерываний;
- 3) выполнять обслуживание ВУ;
- 4) в процессе обслуживания ВУ или при своем завершении сбрасывать бит IS_i ($IS_i = 0$), разрешая обслуживание ВУ с меньшими приоритетами;
- 5) заканчиваться оперативная программа должна командой *IRET*, для восстановления СчК и регистра *Flags*.

Чтобы повторить процедуру прерывания от этого же входа IR_i , необходимо сигнал на входе $IR_i = 0$ вернуть в неактивное состояние и затем вновь установить в «1». Сброс бита $IR_i = 0$ в регистре *IRR* импульсом *INTA1* не изменяет сигнал на входе IR_i . Сигнал на входе IR_i могут сбросить аппаратные средства интерфейса либо оперативная программа. Если какой-либо вход IR_i замаскирован установленным в «1» битом регистра маски *IMR*, то сигнал $IR_i = 1$ зафиксируется в регистре *IRR*, но не обрабатывается шифратором приоритетов. Если выполняемая программа сбрасывает бит $IM_i = 0$, то шифратор приоритетов распознает активный запрос и генерирует ЗП по линии *INT* ЦП.

В процессе работы автоматизированной системы часто возникает необходимость проверить состояние регистров ПКП или изменить режим его работы. Программирование ПКП в процессе работы автоматизированной системы может включать:

- разрешение/запрет отдельных входов запросов;
- опрос внутренних регистров ПКП;
- обслуживание завершения работы оперативной программы (сброс бит IR_i , IS_i);
- изменение режима обслуживания ВУ (вложенных прерываний, круговые циклически изменяемые приоритеты, адресуемые приоритеты, режим опроса).

5.4.3.7. Схема каскадирования и алгоритмы работы ведущего и ведомых контроллеров прерываний

Каскадирование ПКП позволяет объединить несколько контроллеров для расширения числа входов ЗП. Один контроллер работает как ведущий, а до восьми ПКП — как ведомые (рис. 5.26).

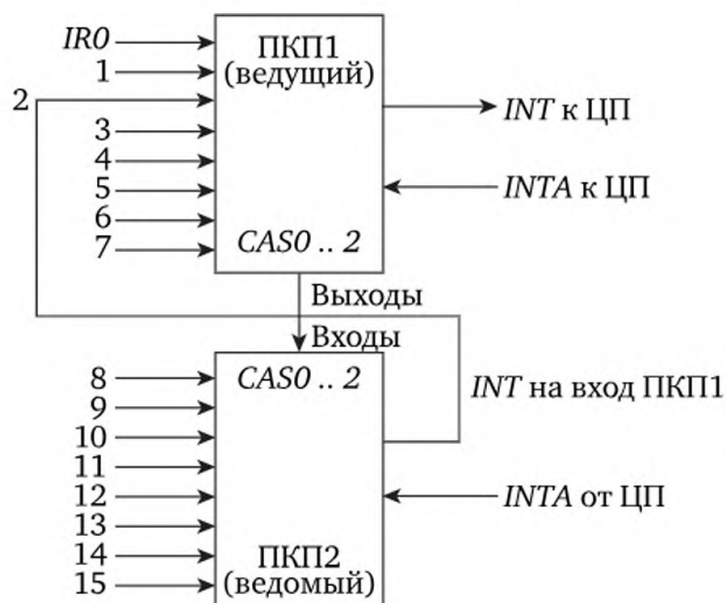


Рис. 5.26. Схема каскадирования контроллеров прерываний

Сигнал *INT* ведомого ПКП подается на один из входов ведущего. Если *IMR* и *PR* не блокируют этот сигнал, он посылается в процессор через вывод *INT* ведущего. Сигнал *INTA* от ЦП поступает ко всем ПКП. Когда ЦП возвращает сигнал *INTA*, ведущий проверяет, возникло прерывание его собственное или от ведомого. Ведущий ПКП должен знать, к каким входам подключены ведомые ПКП, а к каким ВУ.

В случае прерывания от ведомого ведущий ПКП на шину *CAS2..CAS0* выдает код, соответствующий номеру линии *IRi*, к которой подключен ведомый (010 в нашем случае). Сигнал *INTA* поступает на все ведомые ПКП, но его воспринимает только тот прибор, код которого соответствует коду, выданному ведущим контроллером на линии каскадирования. За исключением реакции на сигнал *INTA*, действия всех приборов в системе одинаковы. Приоритеты запросов прерываний в порядке убывания распределяются следующим образом: *IR0*, *IR1*, *IR8*, *IR9*, *IR10*, *IR11*, *IR12*, *IR13*, *IR14*, *IR15*, *IR3*, *IR4*, *IR5*, *IR6*, *IR7* (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Аппаратные прерывания ПКП2 в порядке их приоритетов и назначения

Вход	Номер типа	Назначение входа
<i>IR8</i>	70h	Часы реального времени (<i>RTS clock</i>)
<i>IR9</i>	71h	Программно переводится в <i>IR2</i> (зарезервировано)

Вход	Номер типа	Назначение входа
IR10	72h	Зарезервировано
IR11	73h	Зарезервировано
IR12	74h	Зарезервировано (PS/2 mouse)
IR13	75h	Математический сопроцессор
IR14	76h	Контроллер НЖМД (IDE1) канал 1
IR15	77h	Зарезервировано (IDE2) канал 2

5.4.3.8. Методика программирования обмена данными между электронно-вычислительной машиной и внешним устройством с прерываниями программы

Программирование обмена данными с прерыванием состоит из двух частей:

- 1) подготовки к обмену данными с прерыванием программы, которая выполняется в фоновой программе. Считаем, что инициализация аппаратных средств ЭВМ выполнена при включении питания;
- 2) обслуживания ВУ в режиме прерывания, которое выполняется оперативной программой. Фоновая программа оформляется как основная, оперативная — в виде подпрограммы.

Подготовка к обмену должна включать:

- 1) резервирование памяти для совместного использования фоновой и оперативной программами. В качестве совместно используемой памяти необходимо указать:

- память для хранения данных используется для обмена данными с ВУ. Оперативная программа использует эту область памяти для ввода данных из ВУ или вывода данных во ВУ. Фоновая программа использует эту область памяти для подготовки данных для ВУ или обработки полученных из ВУ данных,

- программный счетчик — переменная, показывающая текущее количество переданных оперативной программой слов в том или ином направлении. Оперативная программа должна модифицировать программный счетчик в каждом цикле обмена с ВУ. Фоновая программа использует эту переменную для проверки завершения обмена данными,

- указатель длины массива данных предназначенных для передачи. Фоновая программа устанавливает в этой переменной общий объем передаваемых слов или байт. Оперативная программа должна запретить ВУ прерывания при передаче установленного фоновой программой объема данных;

- 2) установка вектора прерывания на начало программы обслуживания прерываний. В таблицу векторов прерываний необходимо записать начальный адрес оперативной программы обслуживания ВУ;

3) разрешение прерываний от выбранного ВУ. В регистре управления интерфейсом ВУ необходимо установить в «1» флаги разрешения прерывания ($ФРП = 1$) и сбросить в «0» маски прерываний ($ИМ_i = 0$). Последняя операция подготовки к обмену определяет момент начала совместного выполнения фоновой и оперативной программ. Фоновая программа выполняется всегда, когда нет ЗП от ВУ. Оперативная программа, как более приоритетная, будет прерывать фоновую программу для выполнения операций обмена данными.

Обслуживание ВУ в режиме прерываний. Оперативная программа в каждом цикле обмена должна выполнять следующие действия:

1) сохранение регистров процессора, которые будут модифицированы в процессе ее работы;

2) инкремент (декремент) программного счетчика, т. е. той переменной, которая хранит текущее число переданных слов данных;

3) непосредственный обмен данными между ВУ и областью памяти, зарезервированной для совместного использования фоновой и оперативной программами;

4) сброс запроса прерывания в интерфейсе ВУ, если он не сбрасывается аппаратными средствами;

5) восстановление регистров ЦП;

6) при передаче, установленного фоновой программой, объема данных оперативная программа должна запретить прерывания ВУ.

Если данные вводятся в ЭВМ, фоновая программа должна убедиться в их наличии перед использованием.

В ЭВМ семейства *IBM PC* оперативная программа в некоторый момент времени должна:

1) устанавливать в «1» $IF = 1$ ЦП (в регистре *Flags*), как только это становится возможным, чтобы разрешить прерывания от ВУ с большим приоритетом;

2) сбрасывать бит $ISI = 0$ ПКП (в регистре обслуживаемых запросов *ISR*), чтобы разрешить прерывания от входа IR_i и от входов IR_k с меньшими приоритетами.

5.4.3.9. Реализация методики обмена данными между электронно-вычислительной машиной и внешним устройством с прерыванием программы в автоматизированных системах на основе электронно-вычислительных машин семейства *IBM* (в среде *Borland Pascal*)

Фоновая программа оформляется как главная программа, оперативная — как процедура без параметров. Переменные для совместного использования фоновой и оперативной программами должны быть объявлены глобальными, до объявления оперативной программы.

Установка вектора прерываний на программу обслуживания ВУ (т. е. запись вектора прерываний по определенному адресу) вы-

полняется с помощью стандартной процедуры *Turbo Pascal* из модуля *DOS (WINDOS)*:

```
Procedure SetIntVec (IntNo : byte; IntProcAddr : Pointer);
```

где *IntNo* — номер типа прерывания = АВП = $4 * \text{IntNo}$; *IntProcAddr* — вектор прерывания, содержит начальный адрес программы обработки прерывания; тип *Pointer* — указатель — переменная, которая в качестве своего значения содержит адрес байта в памяти, и этот адрес должен быть адресом первой команды оперативной программы. Указатель — совокупность двух слов, трактуемых как сегмент и смещение.

При установке нового вектора прерываний старый вектор будет утерян, если его предварительно не сохранить. Сохранение старого вектора прерывания в некоторой переменной выполняется процедурой из того же модуля *DOS (WINDOS)*:

```
Procedure GetIntVec(IntNo : byte; Var OldIntProcAddr :  
pointer);
```

Сохранение и восстановление регистров ЦП в программе обслуживания прерываний выполняется с помощью указания специального заголовка процедуры обслуживания прерываний. Все оперативные программы обслуживания прерываний оформляются как процедуры и должны иметь в заголовке ключевое слово *Interrupt*:

```
Procedure IntXXX; Interrupt;
```

Ключевое слово *Interrupt* приводит к генерации машинных команд, обеспечивающих сохранение в стеке всех регистров ЦП при входе в процедуру *IntXXX* и извлечение их из стека при ее завершении. Заканчивается такая процедура командой *IRET* — возврат из прерывания, а не обычной командой возврата из подпрограммы *RET*, что позволяет ЦП восстановить содержимое СчК и РСП.

Установка/сброс флага разрешения прерываний в регистре *Flags* центрального процессора можно выполнить с помощью вставки ассемблерного текста в программу:

```
asm STI end; {IF=1, прерывания разрешены.}  
asm CLI end; {IF=0, прерывания запрещены.}
```

5.4.3.10. Техническая реализация интерфейса обмена данными с прерыванием текущей программы в автоматизированных системах на основе электронно-вычислительных машин семейства IBM

В интерфейсе обмена данными с прерыванием текущей программы появились три новых элемента: схема формирования ЗП, схема учета приоритетов ВУ, схема формирования АВП. Непосредственно в интерфейсе осталась только схема формирования ЗП, а две другие перенесены в ПКП.

Техническую реализацию интерфейса обмена данными с прерыванием рассмотрим на примере *синхронизации ввода-вывода данных с прерываниями* от программируемого интервального таймера (ПИТ). Он выполнен на микросхеме *Intel 8253*, имеет три независимых канала, которым соответствуют адреса на магистрали ВУ ЭВМ: 308h — канал 0, 309h — канал 1, 30Ah — канал 2, 30Bh — управляющий регистр.

На управляющие входы *GATE* всех каналов подан разрешающий потенциал, т. е. разрешен счет. К счетному входу *CLK0* нулевого канала подключен генератор с частотой 1 МГц. Выход *OUT0* нулевого канала соединен со счетным входом *CLK1* канала 1, что позволяет работать с большими временными интервалами ($65\,536 \cdot 65\,536$) мкс $\sim 71,582$ мин ~ 1 ч 11,58 мин.

Выход *OUT1* (рис. 5.27) первого канала таймера соединен с линией *IR3* или *IR4* ПКП (прерывание *COM2*, *COM1*) через схему формирования сигнала ЗП.

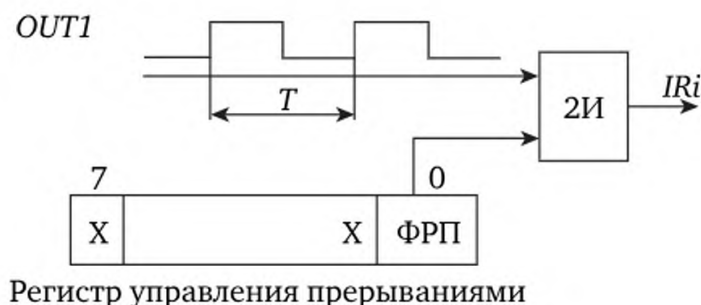


Рис. 5.27. Схема формирования сигнала запрос прерывания в интерфейсе ВУ:
T — интервал времени, за который должно закончиться обслуживание ВУ

Разрешение/запрет прерываний от таймера выполняется установкой/сбросом флага разрешения прерывания (ФРП) в регистре управления прерываниями по адресу 30Fh. Если запустить таймер на генерацию последовательности импульсов с заданным периодом и разрешить прерывания в регистре управления прерываниями, то на вход *IRi* ПКП будут поступать сигналы ЗП, при переходе из нуля в единицу выходного сигнала таймера.

Приведем пример программирования в среде *Turbo Pascal* процедуры ввода в ОЗУ ЭВМ семейства *IBM* массива длиной в 100 значений из 32 канала модуля АЦП, подключенного в режиме с общей землей, в диапазоне ± 5 В, с прерыванием фоновой программы от таймера.

На вход АЦП через один из каналов мультиплексора поступает синусоидальный сигнал с неизвестными параметрами: амплитудой и частотой. Вход *IR3* (номер типа прерывания *Bh*) подключен к выходу схемы формирования ЗП от канала 1 таймера платы *L-154*. Процедура *Set_Time(T:word)*; из модуля *timer154* программирует ка-

нал 1 таймера в режим меандр и устанавливает на его выходе сигнал с периодом, равным T мкс. Здесь T может принимать значения из диапазона 4—65 535 мкс:

```

Program Demo_Int;
Uses Dos, timer154;
const BA = $300; {Базовый адрес платы L154}
      Nmas = 100; {Указатель длины массива}
      count:word=0; {Программный счетчик}
var U:array[0..Nmas] of integer; {Массив для хранения данных}
OldIntB:pointer; T:word; {Период выборок} i:integer; fp:text;
{*****}
Procedure Wait(i:word);
var j:word; begin for j:=0 to i do; end;
Procedure IntADC; interrupt;
{Ключевое слово Interrupt приводит к генерации машинных команд,
обеспечивающих сохранение в стеке всех регистров процессора при
входе
в процедуру IntADC и извлечение их из стека перед выходом
из нее.}
Begin {Здесь возможно сохранение регистров интерфейса ВУ}
Asm STI end;
{Установка IF=1 в регистре ЦП, Разрешение прерываний
от ВУ с высокими приоритетами.}
inc(count); {Инкремент программного счетчика.}
Port[BA + 4] := $FF; {Запуск АЦП}
Asm nop end; {Задержка для надежного начала измерения.}
while (Port[BA + 2] and 8) <> 0 do;
{Ожидание окончания преобразования АЦП.}
U[count] := PortW[BA]; {Чтение данных из регистра данных АЦП.}
if count=Nmas then Port [$21] := Port [$21] or $8; {OCW1}
{Проверка текущего значения программного счетчика count
и запрет прерываний от входа IR3, если значение count равно
конечному значению Nmas.}
Port[$20] := $20; {IS3=0 Сброс бита регистра ISR OCW2, разрешение
прерываний от ВУ с низкими приоритетами.}
{Здесь произойдет восстановление регистров ЦП}
End;
Begin {Основная программа.}
Port [BA + $F] := 0; {Запретил прерывания в интерфейсе
ВУ ФРП=0.}
Port[$21] := Port[$21] OR $8;
      {OCW1. I M3=1. Запрещены прерывания в ПКП от входа IR3}
Port [BA + 2] := $FF;
{Режим с общей землей, 32 канал, усиление 1, диапазон ±5,12В.}
Wait (?);
{Процедура Wait имеется в модуле timer154 и должна обеспечить
задержку ~ 4 мкс на время переключения канала мультиплексора.}
assign (fp, 'esa5.dat');
{$I-} rewrite(fp); {$I+}
if IOresult <> 0 then halt; {Останов, если не открыт файл.}
GetIntVec($B, OldIntB);
{Сохранен старый вектор прерывания от входа IR3 в переменной

```

```

OldIntD.}
SetIntVec($B,@IntADC);
{Установил новый вектор прерывания от IR3 на процедуру IntADC}
write ('Укажите период дискретизации сигнала [мкс]?'); readln
(f);
Set_Time(T); {Запуск таймера.}
Port[BA+$F]:=1;
{Разрешены прерывания от таймера, ФПП=1 в интерфейсе ВУ.}
Port[$21]:=Port[$21] AND (NOT ($8)); {OCW1}
{Разрешены прерывания от IR3 в регистре IMR контроллера преры-
ваний IM3=0.}
{-----}
{Здесь должна быть фоновая программа, которая будет выполняться
совместно с программой ввода данных из АЦП модуля.}
{-----}
{Проверка готовности данных из модуля и ожидание готовности.}
while Nmas <> count do;
Port[BA + $F]:=0; {Сброс ТРП в 0. Запрещены прерывания от тай-
мера.}
SetIntVec($B,OldIntB); {Восстановлен старый вектор прерываний
от входа IR3.}
{Здесь может находиться программа обработки данных, введенных
из ВУ.}
for i:=1 to Nmas do {Преобразование и вывод данных.}
begin
write('U(',i:3,')=',2.5*(U[i] - 2048):8:2,'; ');
if ((i+1) mod 5)=0 then writeln;
end; readln;
for i:=1 to Nmas do {Запись данных в файл.}
begin
write(fp,'U(',i:3,')=',2.5*(U[i] - 2048):8:2,'; ');
if ((i+1) mod 5)=0 then writeln(fp);
end; close(fp); End.

```

5.4.3.11. Категории прерываний электронно-вычислительных машин семейства IBM PC

В ЭВМ семейства IBM PC для векторов прерываний отведена область памяти объемом 1024 байт, с адресами 00000...003FFh. Вектор прерываний представляет собой двойное слово (два слова по 16 разрядов), определяющее сегмент и смещение начального адреса программы обработки прерываний. Таким образом, в ЭВМ семейства IBM PC в таблице векторов прерываний могут быть записаны до 256 различных векторов. Иными словами, ЦП может обрабатывать 256 типов прерываний.

Прерывания разделены на три категории:

- внешние (аппаратные) прерывания;
- внутренние прерывания (по особой ситуации);
- программные прерывания.

Внешние (аппаратные) прерывания, генерируются ВУ в ответ на некоторые события, требующие немедленного внимания ЦП (всего 16 векторов), например: нажатие клавиши на клавиатуре.

Эта категория называется аппаратными прерываниями и управляется ПКП.

Внутренние прерывания, или прерывания по особой ситуации, возникают, когда ЦП наталкивается на абсолютно бессмысленные для него команды или данные:

- прерывание с номером типа 0 соответствует переполнению при делении на ноль;
- прерывание с номером типа 1 вырабатывается после каждой команды при установленном флаге трассировки $TF = 1$ в регистре состояния процессора;
- прерывание с номером типа 4 вырабатывается по специальной команде *INTO*, если установлен флаг переполнения $OF = 1$ в регистре состояния процессора (это условное прерывание по переполнению);
- особое место занимает немаскируемое прерывание *NMI* (*Non-Masked Interrupt*), которое вырабатывается при поступлении внешнего сигнала *NMI* и не зависит от состояния флага разрешения аппаратных прерываний *IF*.

В компьютере оно используется для контроля четности памяти, контроля корректности обмена с памятью и устройствами ввода/вывода, а также для обработки так называемых исключений, т. е. особых условий, возникающих в процессе работы. Немаскируемым оно называется именно потому, что его нельзя запретить.

Программные прерывания (ПП) преднамеренно генерируются программами пользователя для вызова других программ, находящихся в ПЗУ *BIOS* или ОЗУ *DOS*. Программные прерывания не возникают неожиданно. Эта категория прерываний позволяет программам пользователя посылать ЦП сигнал о том, что им нужна помощь со стороны других программ, находящихся в ПЗУ *BIOS* или ОЗУ *DOS*.

Программы *BIOS* и *DOS* могут находиться в разных моделях ЭВМ в разных адресах памяти и, следовательно, не могут вызываться программами пользователя как подпрограммы. Адреса подпрограмм *BIOS* и *DOS* указаны в таблице векторов прерываний. Для вызова этих подпрограмм *BIOS* или *DOS* необходимо знать только номер типа прерывания. Номер типа прерывания указывает на вектор прерываний, содержащий адрес подпрограммы *BIOS* или *DOS*.

Основные черты программных прерываний (ПП):

- 1) ПП функционируют точно так же, как и аппаратные прерывания;
- 2) ПП не разделены по приоритетам и могут вызываться друг из друга;
- 3) аппаратное прерывание может получить управление при выполнении ПП. Существует правило: любая программа обслу-

живания прерывания, как только становится возможным, одной из первых своих команд должна включать прерывания (установить $IF = 1$ в регистре *Flags* ЦП).

Для вызова подпрограмм *BIOS* или *DOS* ЦП имеет соответствующие ассемблерные команды:

INT <номер типа прерывания>.

INT — это ассемблерная команда, а не сигнал ПКП. Номер типа прерывания передается в команде. При выполнении команды *INT* ЦП:

- сохраняет свое состояние;
- вычисляет АВП (по номеру типа прерывания);
- загружает в СчК содержимое вектора прерывания;
- приступает к выполнению соответствующей процедуры.

Языки высокого уровня, такие как *Turbo Pascal*, *Turbo C++* и др. позволяют использовать прерывания *BIOS* и *DOS*. В среде *Turbo Pascal* процедуры обращения к функциям *BIOS* и *DOS* входят в состав библиотечного модуля *DOS.** (*WinDOS.**) и становятся доступными программе после его объявления.

Вызывается программное прерывание с определенным номером типа в среде *Borland Pascal* с помощью процедуры:

Procedure Intr (*IntNo*: byte; *var Regs*: *Registers*);

где *IntNo* — выражение, определяющее номер типа прерывания (0 .. 255); *Regs* — переменная типа *Registers* (*Tregisters*), в которой процедуре обработки прерывания передается информация, загружаемая в регистры ЦП, и возвращается выходная информация.

Для обращения к регистрам ЦП в среде *Borland Pascal* определен специальный тип записи с вариантами.

В модуле *DOS.**: *type Registers* = *record CASE integer OF*

0: (*AX, BX, CX, DX, BP, SI, DI, DS, ES, Flags*: word);
1: (*AL, AH, BL, BH, CL, CH, DL, DH*: byte) *end*;

В модуле *WinDos.**: *type TRegisters* = *record CASE integer OF*

0: (*AX, BX, CX, DX, BP, SI, DI, DS, ES, Flags*: word); 1: (*AL, AH, BL, BH, CL, CH, DL, DH*: byte)
end;

Эти типы дают возможность обращаться к регистрам ЦП, как к 16-битовым или 8-битовым. Перед вызовом программного прерывания некоторая информация может помещаться в регистры ЦП. В основном информация помещается в арифметические регистры: *AX, BX, CX, DX*. При возврате из прерывания некоторые регистры возвращают данные или статусную информацию.

Какая информация помещается в регистры ЦП? Один и тот же номер типа прерывания может содержать несколько функций. Для указания номера функции все прерывания *BIOS* и *DOS* используют

регистр *АH* (старший байт регистра *АХ*). В регистре *AL* (младший байт *АХ*) может содержаться номер подфункции. Таким образом, через переменные этого типа передаются параметры процедуре обработки прерывания и выходная информация в вызывающую программу.

В табл. 5.4 перечислены функции *BIOS*.

Таблица 5.4

Краткий обзор функций *BIOS*

Номер типа	Группа функций
5	Печать графической копии экрана
10h	Видеофункции
11h	Оборудование ЭВМ
12h	Объем памяти
13h	Управление дисковыми
14h	Управление последовательным портом
16h	Управление клавиатурой
17h	Управление параллельным портом
19h	Перезапуск системы (как CTRL-ALT-DEL)
1A	Запрос/установка даты
33h	Мышь

Пример. Прочитать объем ОЗУ:

```
Program IntrMEM; Uses DOS; var R: registers; Begin Intr($12, R);
{R не инициализирован.}
writeln(' Объем ОЗУ =', R. AX, 'Кбайт'); End.
```

Пример. Определить наличие сопроцессора.

```
Program INTR_copr; Uses DOS; var R: registers;
Begin Intr($11, R); {R не инициализирован.}
If (R. ax AND 2) <> 0 then writeln(' Есть сопроцессор!')
else writeln('Сопроцессор отсутствует!'); End.
Procedure MsDos (var Reg : Registers);
```

может использоваться для обращения к более чем 85 функциям *DOS*.

Она эквивалентна вызову процедуры *Intr* с номером прерывания *21h*, т. е. инициирует прерывание с номером типа *21h*.

Пример. Получить версию ОС.

```
Uses WinDOS, WinCRT;
var R: Tregisters;
Begin R. AH:=$30; MsDos(R); Writeln ('Версия ОС =', R. AL,':',
R. AH); End.
```

5.5. Программируемые интервальные таймеры-счетчики

Программируемые интервальные таймеры-счетчики (ПИТ) предназначены:

- для синхронизации работы различных элементов АС во времени;
- формирования временных интервалов;
- измерения длительности импульсов, частоты и периода сигналов;
- деления частоты сигналов;
- подсчета числа внешних событий или числа импульсов за прошедшее время.

Программируемые интервальные таймеры-счетчики реагируют на входные сигналы уровней TTL (*transistor-transistor logic* — транзисторно-транзисторная логика вырабатывают TTL-сигналы на выходах: 0 В — низкий, 5 В — высокий).

В общем случае счетчик/таймер представляет собой логическое устройство с регистром, хранящим текущее значение счета, и тремя или более входами/выходами.

Обобщенная функциональная схема ПИТ (рис. 5.28) включает: регистр счетчика, два входа и один выход.

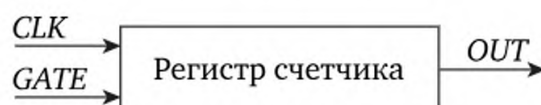


Рис. 5.28. Обобщенная функциональная схема ПИТ

Аббревиатура *CLK (clock)* — вход импульсов синхронизации. Импульсы на входе *CLK* подсчитываются счетчиком. При появлении фронта каждого входного импульса счетчик *увеличивает* или *уменьшает* содержимое регистра счетчика. В регистр счетчика можно предварительно записать некоторое число — константу пересчета, и счетчик начнет считать с этого значения. Содержимое *регистра* счетчика можно прочесть, и оно всегда отражает текущее число импульсов, поступившее на вход *CLK*.

GATE — Входные ворота. Вход *GATE* служит для управления счетом:

- *GATE* = 1 разрешает счет;
- *GATE* = 0, запрещает счет.

Изменение состояния сигнала на входе *GATE* может выполняться аппаратными средствами или ПО.

OUT — Выход ПИТ. Выход *OUT* переключается в зависимости от выбранного режима работы. Если содержимое регистра счетчика увеличивается с каждым импульсом на входе *CLK*, выход *OUT* переключается, когда счетчик достигает максимального значения. Са-

мое высокое значение счетчика называется *terminal count* — конец счета. Если содержимое регистра счетчика уменьшается с каждым импульсом на входе *CLK*, то выход *OUT* переключается, когда счетчик достигает нулевого значения. Это значение счетчика также называется *terminal count* — конец счета.

На выходе *OUT* ПИТ генерируют различные импульсы уровней TTL или последовательности импульсов. Выход таймера *OUT* подключаются к устройствам ввода-вывода для инициирования необходимых действий или к линии запрос прерывания *IRi* программированного контроллера прерываний для инициирования прерываний.

5.5.1. Основные характеристики счетчиков/таймеров

Наиболее важными характеристиками счетчиков/таймеров являются: разрешение и максимальная тактовая частота. Разрешение — это число разрядов счетчика, которое определяет, до какого максимального значения он может считать. Стандартные современные счетчики имеют разрешение 16—48 разрядов. Максимальная тактовая частота определяет максимальную скорость, с которой можно переключать четный вход *CLK*. При большей тактовой частоте счетчик считает быстрее и, таким образом, может фиксировать более высокочастотные сигналы на входе *CLK* и генерировать более высокочастотные импульсы на выходе *OUT*. Счетчики работают с максимальной тактовой частотой от 1 до 80—100 МГц.

Существуют реверсивные счетчики/таймеры, которые могут считать как в прямом, так и обратном направлении в зависимости от уровня внешних цифровых сигналов на дополнительных входах.

5.5.2. Программируемый таймер-счетчик *Intel 8253, 8254*

Программируемые интервальные таймеры-счетчики строятся на основе функционально ориентированных программно управляемых интерфейсных БИС, в частности на микросхемах *Intel 8253, 8254*. Полное описание этих микросхем можно найти в справочной литературе¹ или по их отечественным аналогам К-580ВИ53 и К-1810ВИ54. Эти ПИТ программно совместимы и отличаются быстродействием и некоторыми функциональными возможностями.

Технические характеристики:

- число независимых каналов — 3;
- число режимов каждого из каналов — 6;
- разрешение каждого канала — 16 бит с диапазоном счета от 65 535 до 0;
- содержимое регистра счетчика уменьшается с каждым импульсом на входе *CLK*;

¹ Виноградова Н. А., Есюткин А. А., Филаретов Г. Ф. Проектирование автоматизированных систем научных исследований. М. : МЭИ, 1987; Финогенов К. Г. Программирование измерительных систем реального времени. М. : Энергоатомиздат, 1990.

- состояние *terminal count* (конец счета) наступает, когда содержимое регистра счетчика становится равным нулю;
- максимальная частота счета — (*Intel 8254*) 8 МГц, (*Intel 8253*) 2 МГц;
- формат счета импульсов — двоичный или двоично-десятичный;
- счетчик выполнен по КМОП технологии, напряжение питания — от 3 до 6 В;
- корпус пластиковый *DIP* (*Dual-in-Line Package*) — с двухсторонним расположением выводов содержит 24 вывода.

Характерной особенностью устройств, выполненных на основе программно управляемых интерфейсных БИС, является необходимость их инициализации после включения питания и программирования режима их работы.

5.5.3. Схема включения программируемого интервального таймера в автоматизированную систему

Подключение ПИТ к АС осуществляется по общим правилам подключения интерфейсной БИС к системной магистрали МПС.

Выводы микросхемы:

- *D7-D0* — двунаправленные трехстабильные (с тремя состояниями) выводы данных. Подключаются к шине данных ЭВМ для приема управляющей информации от процессора или передачи статусной информации процессору;
- $\neg RD$, $\neg WR$ — входы сигналов управления чтение, запись, активный уровень сигнала — низкий. В ЭВМ семейства *IBM* эти выводы подключаются к линиям ввод ($\neg IOR$), вывод ($\neg IOW$) для приема от ЦП сигналов чтения, записи регистров ПИТ;
- $\neg CS$ — выбор кристалла — вход 0/1, разрешает или запрещает связь ПИТ с системной шиной. Подключается к ША посредством дешифратора адреса. Когда сигнал на входе $\neg CS=1$ линии данных переключаются в высокоимпедансное состояние, запрещая чтение или запись в регистры ПИТ;
- *A1, A0* — адресные входы подключаются к соответствующим адресным линиям магистрали для адресации к внутренним регистров ПИТ.

На магистрали системы ПИТ занимает четыре адреса. Каналы счетчика таймера (рис. 5.29) подключаются к внешним устройствам с помощью трех линий (*CLK, GATE, OUT*):

- *CLK* [0-2] — входы тактовых сигналов каждого из каналов используются для управления счетным элементом *CE* канала и определяют скорость счета. Фронт сигнала на входе *CLK* приводит к уменьшению содержимого счетного элемента на единицу;
- *GATE*[0-2] — управляющие входы запуска, останова или перезапуска счета для трех каналов ПИТ, в соответствии с установленным режимом работы;

- $OUT[0-2]$ — выходы счетчиков переключаются в соответствии с установленным режимом работы при достижении счетчиком значения «0».

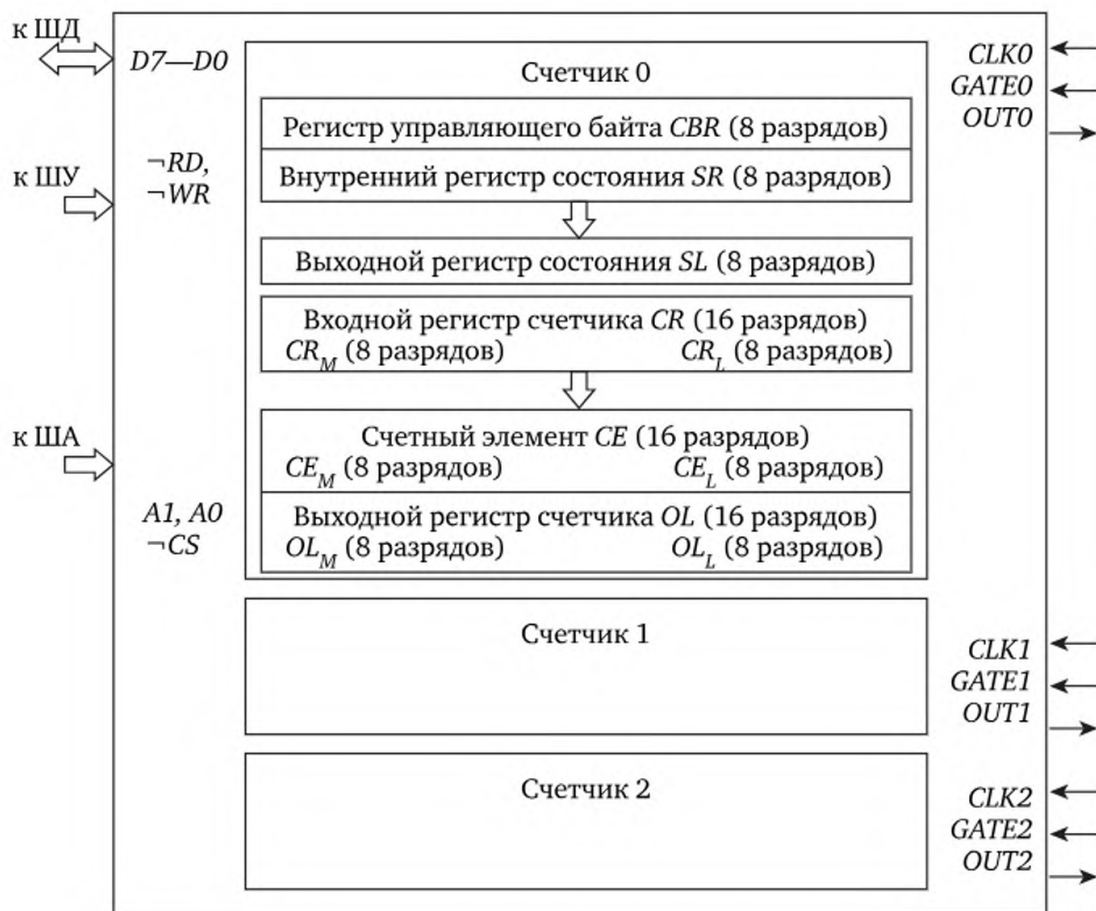


Рис. 5.29. Функциональная схема ПИТ Intel 8253, 8254

Состав, назначение и порядок взаимодействия регистров каналов ПИТ. Программно доступные регистры ПИТ приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Карта программно доступных регистров ПИТ

Регистр	Разрядность	Тип доступа	Относительный адрес		
			Канал 0	Канал 1	Канал 2
Входной регистр счетчика CR	16	Запись	0	1	2
Выходной регистр счетчика OL	16	Чтение	0	1	2
Выходной регистр состояния SL	8	Чтение	0	1	2
Регистр управляющего байта CBR	8	Запись	3	3	3

Регистр управления. Регистр управляющего байта *CBR* (*Control Byte Register*), определяет режим работы канала таймера. *CBR* восьмиразрядный, доступен ЦП для записи, относительный адрес = 3 для любого канала. Номер канала должен задаваться в самом формате управляющего байта.

Регистры состояния. Внутренний регистр состояния *SR* (*Status Register*) хранит режим работы канала таймера, состояние выхода *OUT* и состояние счетчика. Регистр восьмиразрядный, ЦП не доступен. Выходной регистр состояния *SL* (*Status Latch*) предназначен для чтения текущего состояния таймера (только в *Intel 8254*). Регистр *SL* восьмиразрядный, процессору доступен для чтения. Относительные адреса регистров соответствующих каналов = 0, 1, 2. Информация из внутреннего регистра состояния *SR* (*Status Register*) может переписываться в выходной регистр состояния *SL* (*Status Latch*) по команде процессора.

Регистры счетчика. Входной регистр счетчика *CR* (*Count Register*) предназначен для хранения начального значения счетчика канала — константы пересчета. Входной регистр *CR* счетчика 16-разрядный, ЦП доступен для записи, относительные адреса регистров соответствующих каналов = 0, 1, 2. Содержимое входного регистра счетчика *CR* может загружаться в счетный элемент *CE* для счета, если это требуется в текущем режиме работы таймера. Счетный элемент *CE* (*Counting Element*) 16-разрядный, работает в режиме вычитания. Содержимое счетного элемента *CE* уменьшается по заднему фронту сигнала на входе *CKL* при условии, что на входе *GATE* установлен уровень логической «1».

В зависимости от режима работы ПИТ, при достижении счетным элементом (*CE*) состояния *terminal count* тем или иным образом изменяется выходной сигнал *OUT*. Сам счетный элемент *CE* прямо процессору не доступен. Он может загружаться из входного регистра счетчика *CR* и считываться посредством передачи его содержимого в выходной регистр счетчика *OL* (*Output Latch*). Выходной регистр счетчика *OL* сопровождает счетный элемент при работе канала. Выходной регистр *OL* 16-разрядный, ЦП всегда доступен для чтения, относительные адреса регистров соответствующих каналов = 0, 1, 2. Выходной регистр счетчика *OL* может использоваться для запоминания текущего содержимого счетного элемента *CE* без остановки процесса счета.

5.5.4. Форматы регистров программируемого интервального таймера

Регистр управляющего байта *CBR* позволяет указать для выбранного канала:

- формат счета (двоичный или двоично-десятичный);
- один из шести режимов работы счетчика;

- порядок загрузки констант во входной регистр счетчика *CR* и порядок чтения текущего содержимого счетного элемента из выходного регистра счетчика *OL*.

Номер бита	7	6	5	4	3	2	1	0
Назначение бита	<i>SC</i>		<i>RW</i>		<i>MODE</i>			<i>BCD</i>

Поле *BCD* (*binary coded decimal*) определяет формат счета счетного элемента *CE*: 0 — двоичный, 1 — двоично-десятичный. В двоичном формате константа задается в диапазоне 0—65 535, в двоично-десятичном — в диапазоне 0—9999. Значение константы пересчета $N = 0$ во всех режимах интерпретируется как 2^{16} или 10^4 в зависимости от формата счета.

Поле *MODE* определяет режим работы канала:

- 000 — (режим 0) прерывание по завершении счета (*Interrupt on Terminal Count*);
- 001 — (режим 1) аппаратно перезапускаемый одновибратор (*Hardware retriggerable one-shot*);
- X10 — (режим 2) импульсный генератор частоты (*Rate Generator*);
- X11 — (режим 3) генератор меандра (*Square Wave Generator*);
- 100 — (режим 4) программно запускаемый одновибратор (*Software Triggering Strobe*);
- 101 — (режим 5) аппаратно запускаемый одновибратор (*Hardware Triggering Strobe*).

Позже рассмотрим, как изменяется с выход *OUT* при достижении состояния *TC* в зависимости от выбранного режима работы канала.

Поле *RW* определяет порядок загрузки констант во входной регистр счетчика *CR* через однобайтовый порт, порядок считывания содержимого выходного регистра счетчика *OL*, а также команду *CLO* фиксации текущего содержимого счетного элемента *CE*:

- 00 — команда *CLO* (*Counter Latch Operation*), фиксация текущего значения счетного элемента *CE* в выходном регистре счетчика *OL*;
- 01 — запись/чтение только младшего байта;
- 10 — запись/чтение только старшего байта. Константа задается одним байтом — младшим или старшим;
- 11 — запись/чтение младшего, затем старшего байтов.

Команда *CLO* фиксирует состояние счетного элемента *CE* в выходном регистре счетчика *OL*. Информация из *OL* может быть считана процессором без приостановки счета в любое время. Поле *SC* (*Select Counter*) определяет номер канала, для которого предназначено управляющее слово или команду чтения состояния таймера: 00 — канал 0; 01 — канал 1; 10 — канал 2; 11 — команда чтения состояния таймера *RBC* (*read backward count*) (для *Intel 8254*), запрещено (для *Intel 8253*).

Формат команды *CLO* (*Counter Latch Operation*), фиксация текущего значения *CE* (счетного элемента) в выходном регистре счетчика *OL*. Здесь 00 — код команды *CLO*, *SC* — канал.

Формат команды *CLO*

Номер бита	7	6	5	4	3	2	1	0
Назначение бита	<i>SC</i>		0 0		<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>

Команда «чтение состояния таймера» (*Intel 8254*) *RBC* (*read backward count*). В ЭВМ семейства *IBM* таймер *Intel 8254* позволяет выполнить команду *RBC* — чтение состояния таймера. Данная команда позволяет прочитать следующие параметры одного или нескольких каналов в выбранный момент времени:

- текущее значение регистра состояния *SR*;
- текущее значение счетного элемента *CE* без приостановки счета.

Формат команды *RBC* (команда записывается в регистр управляющего байта *CBR*):

Номер	7	6	5	4	3	2	1	0
Значение	1	1	\overline{Count}	\overline{Status}	<i>CNT2</i>	<i>CNT1</i>	<i>CNT0</i>	0

Биты:

- 7, 6 — код команды чтение состояния *RBC* (*read backward count*);
- *Count* — указывает, должны ли защелкиваться выходные регистры счетчиков: 0-1 — защелкнуть/не защелкивать;
- *Status* — определяет необходимость защелкивания выходных регистров состояния: 0-1 — защелкнуть/не защелкивать;
- *CNT2*, *CNT1*, *CNT0* — задают каналы таймера, для которых выполняется защелкивание выходных регистров: 1-0 — выполнить операцию/не выполнять.

При выполнении команды чтения состояния содержимое внутреннего регистра состояния *SR* может заноситься в выходной регистр состояния *SL*, а значение выходного регистра счетчика *OL* — защелкиваться.

Формат выходного регистра состояния *SL* (*Status Latch*), восемь разрядов, (только в *Intel 8254*). Процессору регистр *SL* доступен для чтения, используется для чтения текущего состояния таймера.

Номер	7	6	5	4	3	2	1	0
Значение	<i>OUT</i>	<i>Count</i>	<i>RW</i>		<i>Mode</i>		<i>BCD</i>	

Биты:

- *OUT* определяет состояние выхода канала таймера: 1-0 — высокий/низкий уровень;

- *Count* описывает состояние счетчика: 0-1 — выходной регистр счетчика отражает текущее значение счетного элемента канала/неопределенное состояние (например, когда счет в канале не выполняется);
- остальные биты аналогичны соответствующим битам, задаваемым в управляющем байте при инициализации канала.

5.5.5. Режимы работы таймера

Режимы работы таймера разделяются на три группы по правилам загрузки счетного элемента *CE* содержимым входного регистра счетчика *CR*.

1. *Режимы 0, 4 — однократное выполнение функций.* При $GATE = 1$ константа из входного регистра счетчика *CR* передается в счетный элемент *CE* по первому тактовому импульсу *CLK*. С приходом последующих импульсов на вход *CLK* происходит уменьшение содержимого *CE*. Если во время счета на вход *GATE* подать «0», то это приведет к останову счета. Новый положительный сигнал на входе *GATE* не вызывает перезагрузку счетного элемента, а только разрешает продолжение счета.

По окончании счета выполнение действий заканчивается. При необходимости повторения функции, требуется новое программирование — загрузка новой константы пересчета. Если во время счета загружается новое значение константы пересчета во входной регистр счетчика *CR*, оно заносится в *CE* на следующем такте *CLK* и счет продолжается с нового значения. После достижения нулевого значения счет не прекращается, а продолжается с переходом через 0 ($FFFFh = 65\,535 = -1$). Далее содержимое счетчика уменьшается на 1 на каждом такте *CLK*.

Режим 0 (прерывание по завершению счета). Сразу после загрузки управляющего байта на выходе *OUT* устанавливается сигнал низкого уровня $OUT = 0$. Счет разрешается положительным уровнем сигнала на входе $GATE = 1$. По первому тактовому импульсу происходит загрузка *CE* константой из входного регистра счетчика *CR*, и только второй тактовый импульс принимает участие в счете.

Загрузка новой константы *N1* устанавливает $OUT = 0$.

Если $GATE = 1$, выход *OUT* установится в единицу через $(N1 + 1)T_{CLK}$, где *N1* — новая константа.

Режим 4 (программно запускаемый одновибратор). Сразу после загрузки управляющего байта на выходе *OUT* устанавливается сигнал высокого уровня. Высокий уровень сигнала на входе *GATE* разрешает счет. Первый тактовый импульс загружает в счетный элемент *CE* константу из входного регистра счетчика *CR*, и только второй тактовый импульс начинает счет.

На выходе *OUT* через $N + 1$ тактовых периодов устанавливается сигнал низкого уровня на время одного периода T_{CLK} тактовой частоты.

2. *Режимы 1, 5 — работа с перезапуском.* Для них характерна возможность повторения запрограммированных функций без перепрограммирования. Загруженная константа сохраняется во входном регистре счетчика CR , а ее передача в счетный элемент CE осуществляется по переднему фронту на входе $GATE$ независимо от завершения счета. После загрузки управляющего байта в CBR на выходе OUT устанавливается высокий уровень сигнала $OUT = 1$. Загрузка константы в счетный элемент CE выполнится при положительном фронте сигнала на входе $GATE$. Каждый фронт сигнала на входе $GATE$ приводит к загрузке счетного элемента CE из входного регистра CR .

Режим 1 (аппаратно перезапускаемый одновибратор). При загрузке константы пересчета в счетный элемент (по фронту $GATE$) на выходе OUT устанавливается сигнал низкого уровня $OUT = 0$ длительностью $T = T_{CLK} \cdot N$, который изменяется по окончании счета.

Режим 5 (аппаратно запускаемый одновибратор). Загрузка константы в счетный элемент выполнится при положительном фронте сигнала на входе $GATE$. На выходе OUT после завершения счета устанавливается сигнал низкого уровня на время одного периода T_{CLK} .

3. *Режимы 2, 3 — работа с автозагрузкой.* Здесь входной регистр счетчика CR автоматически переписывается в счетный элемент CE после завершения счета. Эти режимы используются для создания импульсных генераторов и генераторов меандра. После записи CBR сигнал на выходе OUT устанавливается в высокий уровень. При $GATE = 1$ на выходе OUT формируются импульсы частотой $F_{OUT} = F_{CLK} / N$, или, соответственно, периода $T_{OUT} = T_{CLK} \cdot N$.

При подаче сигнала $GATE = 0$ счет приостанавливается и на выходе OUT устанавливается напряжение высокого уровня. Если установить $GATE = 1$, счет возобновляется с начального значения счета. Перезагрузка канала новой константой не влияет на текущий счет. Новый счет начинается по окончании предыдущего.

Обратите внимание: поскольку $N = F_{CLK} / F_{OUT} = T_{OUT} / T_{CLK}$ — должно быть целым числом, на выходе OUT можно установить только частоты F_{OUT} , кратные F_{CLK} , или периоды T_{OUT} , кратные T_{CLK} . Если N округляется, то частота не совпадает с желаемой частотой.

Режим 2 (импульсный генератор частоты). На выходе OUT с частотой $F_{OUT} = F_{CLK} / N$ устанавливается нулевой потенциал на время одного периода T_{CLK} , где N — загруженная константа.

В момент достижения счетчиком значения $= 1$ сигнал OUT устанавливается в низкий уровень на один такт T_{CLK} .

Режим 3 (генератор меандра). На выходе OUT формируются импульсы с длительностью полупериодов, равной:

- для положительных полупериодов при четных N : $T_{out+} = T_{clk} \cdot (N + 1) / 2$;
- для отрицательных полупериодов при нечетных N : $T_{out-} = T_{clk} \cdot (N - 1) / 2$.

Содержимое счетного элемента CE в этом режиме уменьшается на 2 с каждым импульсом T_{clk} . Состояние TC достигается дважды за один период генератора. Минимальные значения N счетчика: для режимов 0, 1, 4, 5 составляют 1, для режимов 2, 3 составляют 2. Максимальные значения N счетчика для всех режимов равны нулю, что соответствует значению 65 536 или 10 000 в зависимости от формата счета.

5.5.6. Методика программирования работы каналов таймера

Программирование каналов ПИТ включает:

- инициализацию одного или нескольких каналов;
- чтение текущего значения счетного элемента таймера CE ;
- чтение состояния таймера (только *Intel 8254*).

Инициализация ПИТ включает:

- запись управляющих байтов, определяющих режимы работы каналов, в регистр управляющего байта CBR ;
- запись констант пересчета во входные регистры счетчиков CR .

Управляющие слова загружаются в один тот же регистр CBR . Адрес канала указывается в самом формате управляющего байта CB . Управляющие слова каналов сохраняются на все время работы до следующего программирования. Константа пересчета может быть задана одним байтом (младшим или старшим) или 16-разрядным словом, как определено в поле RW управляющего байта. Константа пересчета загружается во входной регистр счетчика выбранного канала CR . В процессе работы канала константа пересчета может загружаться многократно, если это необходимо по условиям функционирования канала.

Порядок загрузки каналов управляющими словами и константами пересчета строго определен. Общие обязательные требования при программировании:

1) загрузка регистра управляющего байта CBR должна опережать загрузку константы пересчета;

2) загрузка константы пересчета во входной регистр счетчика CR всегда должна выполняться до конца, как это определено полем RW .

Возможны два варианта программирования каналов:

1) загрузка в любой последовательности сначала всех управляющих слов в регистр управляющего байта CBR , затем всех констант пересчета во входные регистры счетчиков CR ;

2) загрузка регистра управляющего байта CBR для выбранного канала, а затем константы пересчета во входной регистр счетчика CR для того же канала.

Сразу после программирования канала таймер начнет выполнять заданную функцию.

Чтение текущего значения счетного элемента CE . Существуют четыре варианта чтения текущего содержимого счетного элемента.

В процессе работы ПИТ внутренний счетный элемент *CE* любого канала отображается в выходной регистр счетчика *OL*. Это означает, что содержимое выходного регистра счетчика идентично содержимому внутреннего счетного элемента.

1. Выходной регистр счетчика можно читать в любой момент времени (на лету). При таком чтении считывается младший байт счетчика, либо старший байт (если константа задана в виде одного байта), либо сначала младший, а затем старший байты (если константа задана в виде 16-разрядного слова), как это определено режимом чтения-записи, указанном в управляющем байте канала при его инициализации. Необходимо, однако, помнить, что операция чтения должна быть выполнена до конца. Такой метод чтения текущего содержимого счетного элемента канала (на лету) не считается корректным, так как значения младшего и старшего байта счетчика считываются в разные моменты времени и могут быть рассогласованы между собой.

2. Приостановка работы канала с помощью сигнала $GATE = 0$ и считывание значения выходного регистра счетчика *OL*.

3. Чтение по команде *CLO* («Защелка») позволяет прочесть состояние *CE* в любой момент времени без остановки счета. Команда загружается в ПИТ так же, как управляющий байт *CBR*, и имеет формат, представленный ниже.

Номер бита	7	6	5	4	3	2	1	0
Назначение бита	SC		0 0		X	X	X	X

Поле *SC* определяет номер канала, для которого выполняется команда *CLO*, биты, обозначенные X, не кодируются в данном сообщении (обычно 0). После загрузки команды *CLO* «Защелка» операция чтения выполняется так же, как в первом случае. Фактически команда *CLO* защелкивает выходной регистр счетчика *OL*, и он перестает сопровождать внутренний счетный элемент. Выходной регистр счетчика *OL* остается в таком состоянии до тех пор, пока не будет считан или пока соответствующий канал не будет перепрограммирован. Информация из *OL* может быть считана в любое время.

Сразу после чтения выходного регистра счетчика (одного или двух байтов), выходной регистр счетчика автоматически расщелкивается, т. е. возвращается в состояние сопровождения внутреннего счетного элемента. Необходимо, однако, иметь в виду, что если операция чтения не выполнена или выполнена не до конца, то новая команда *CLO* не воспринимается.

4. Чтение состояния таймера *RBC* — *read backward count* (только *Intel 8254*). Данная команда позволяет прочесть следующие параметры любого канала или нескольких каналов:

- текущее значение выходного регистра состояния *SR*;
- текущее значение счетного элемента *CE* (4 вариант чтения счетного элемента).

При выполнении команды чтения состояния *RBC* содержимое внутреннего регистра состояния *SR* заносится в выходной регистр состояния *SL*, а значение счетного элемента *CE* защелкивается в выходном регистре счетчика *OL*.

Формат команды чтения состояния таймера:

Номер	7	6	5	4	3	2	1	0
Значение	1	1	\overline{Count}	\overline{Status}	<i>CNT2</i>	<i>CNT1</i>	<i>CNT0</i>	0

Биты:

- 7, 6 — код команды чтения состояния *RBC* (*read backward count*);
- *Count* — указывает, должны ли защелкиваться выходные регистры счетчиков *OL*: 0-1 — защелкнуть/не защелкивать;
- *status* — определяет необходимость защелкивания выходных регистров состояния *SL*: 0-1 — защелкнуть/не защелкивать;
- *CNT2*, *CNT1*, *CNT0* — указывают каналы таймера, для которых выполняется защелкивание выходных регистров: 1-0 — выполнить операцию/не выполнять.

Команда чтения состояния может быть выполнена для нескольких каналов одновременно. Пример: команда *CEh* защелкивает выходные регистры счетчиков и выходные регистры состояния всех каналов.

Сразу после записи в регистр управляющего байта *CRB* команды чтения состояния *RBC* для каждого из указанных каналов таймера выполняются следующие действия:

- в выходной регистр состояния канала *SL* заносится информация о состоянии канала *SR*;
- в выходном регистре счетчика *OL* защелкивается текущее значение счетного элемента *CE*.

Выходные регистры канала остаются в таком состоянии до тех пор, пока не будут считаны или пока соответствующий канал не будет перепрограммирован. Считывание выполняется из адреса регистра канала. Сначала считывается значение из выходного регистра состояния (если было запрошено чтение состояния), а затем из выходного регистра счетчика (если было запрошено защелкивание этого регистра).

Формат байта состояния канала:

Номер	7	6	5	4	3	2	1	0
Значение	<i>OUT</i>	<i>Count</i>	<i>RW</i>		<i>Mode</i>			<i>BCD</i>

Биты:

- *OUT* определяет состояние выхода канала таймера: 1-0 — высокий/низкий уровень;
- *Count* описывает состояние счетчика: 0-1 — выходной регистр счетчика отражает текущее значение счетного элемента ка-

нала/неопределенное состояние (например, когда счет в канале не выполнялся);

- остальные биты аналогичны соответствующим битам, задаваемым в управляющем байте при инициализации канала.

5.5.7. Синхронизация операций реального времени в электронно-вычислительных машинах семейства IBM

Системный таймер ЭВМ семейства IBM PC (Intel 8254, K1810BH54). В ЭВМ семейства IBM PC задействованы все три канала таймера. Схема включения ПИТ Intel 8254 в ЭВМ семейства IBM PC показана на рис. 5.30. Базовый адрес ПИТ в пространстве адресов ввода-вывода равен 40h. Адреса регистров каналов: 40h — канал 0, 41h — канал 1, 42h — канал 2, CBR (на рисунке не показан) имеет адрес 43h.

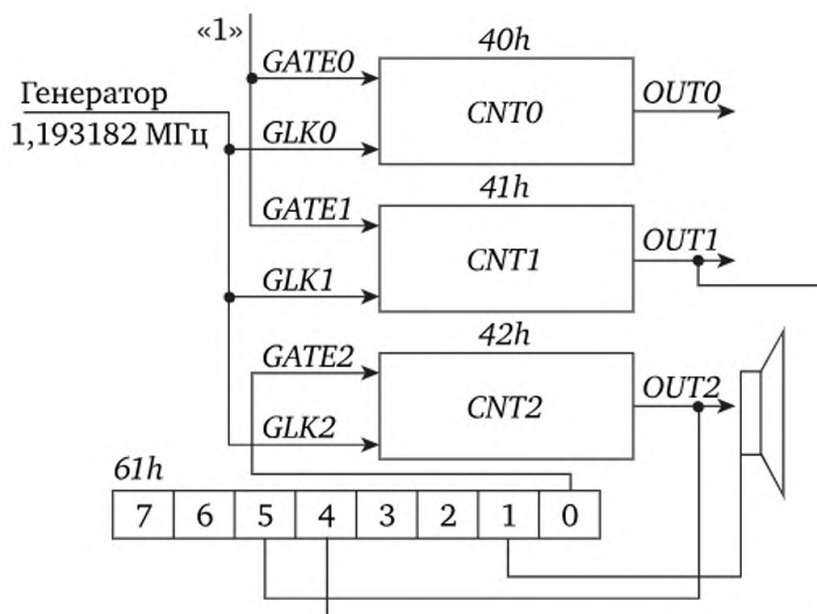


Рис. 5.30. Схема включения ПИТ Intel 8254 в ЭВМ семейства IBM PC

На входах *GATE* каналов «0» и «1» установлен разрешающий потенциал — разрешен счет. Вход *GATE2* управляется битом 0 управляющего порта (Intel 8255). На входы *CLK* всех каналов подключен генератор 1,193182 МГц.

5.5.8. Назначение каналов программируемого интервального таймера в электронно-вычислительных машинах семейства IBM

Канал 0 таймера используется для отсчета текущего времени в системных часах времени суток, а также для синхронизации некоторых дисковых операций. При инициализации канала он программируется BIOS для работы в режиме 2 (или 3) с двухбайтовым начальным значением счетчика равным $N = 0$, $BCD = 0$. При таком режиме

период таймера составляет $T_{OUT0} \sim 55$ мс, т. е. он выдает импульсы с частотой приблизительно $F_{OUT0} = 1\,193\,182/65\,536 = 18,2$ Гц. Выход *OUT0* подключен к линии *IR0* ПКП и вырабатывает прерывание таймера (номер типа прерывания 8). Это прерывание вырабатывается всегда, если разрешены аппаратные прерывания:

- вход *IR0* имеет самый высокий приоритет обслуживания;
- на входе *GATE0* всегда высокий уровень (разрешена работа канала);
- маска канала $IM0 = 0$ в регистре масок ПКП сброшена в «0».

Стандартный обработчик прерывания таймера, установленный BIOS, выполняет следующие три действия:

1) увеличивает на одно текущее значение четырехбайтовой переменной, располагающейся в области данных BIOS по адресу *0000:046Ch* (*40h:6Ch*) — счетчик тиков таймера. В ячейку ОЗУ с адресом *0000:046Ch* (*40h:6Ch*) добавляется единица. При достижении 12 ч ночи ЦП обнуляет это слово и устанавливает в 1 байт по адресу *0040h:0070h*, указывая что выполнен переход через полночь;

2) уменьшает на единицу содержимое байта счетчика ожидания времени выключения мотора НГМД (адрес *40h:40h*). Если после последнего обращения к НГМД прошло более 2 с, обработчик прерывания выключает двигатель. Ячейка с адресом *0000h:0440h* (*40h:40h*) содержит время, оставшееся до момента выключения двигателя. Это время постоянно уменьшается обработчиком прерывания и когда оно становится равным нулю, обработчик прерывания выключает двигатель НГМД;

3) последнее действие, которое выполняет обработчик прерывания таймера, — вызов прерывания с номером типа *1Ch*.

После инициализации системы BIOS вектор прерывания с номером *1Ch* указывает на команду *IRET* (возврат), т. е. ничего не выполняется. Программа пользователя может установить собственный обработчик этого прерывания для того, чтобы выполнять какие-либо периодические действия, например, наряду с выполнением основной программы опрашивать состояние аппаратуры управления объектом автоматизации.

Необходимо отметить, что во время выполнения прерывания *1Ch* все аппаратные прерывания запрещены. В частности, запрещены прерывания клавиатуры (так как $ISO = 1$).

Возможно использование канала 0 ПИТ для управления компонентами АС с интервалом кратным 55 мс (равным или большим). Канал 0 таймера может использоваться и для программирования более коротких интервалов времени. При перепрограммировании таймера на меньший интервал необходимо корректно передавать управление базовому обработчику прерываний таймера, чтобы не нарушать отсчет текущего времени и работу других программ.

Канал 1 используется как генератор для схемы регенерации памяти. BIOS программирует его в режиме 2 (генератор импульсов) с однобайтным счетчиком (младший байт), начальное значение счетчика $N1 = 18$. Такой счетчик обеспечивает интервал чуть больший 15 мкс: $T_{OUT1} = N1/F_{CLK}$; $T_{OUT1} = 18/1,193182 \sim 15$ мкс.

Не рекомендуется перепрограммировать канал 1, так как это нарушит цикл регенерации памяти и приведет к разрушению ее содержимого. Этот канал таймера можно использовать для отсчета коротких интервалов времени. Следует проверять бит 4 управляющего порта $61h$ (микросхема Intel 8255), который меняет свое состояние на противоположное каждый цикл первого канала (т. е. примерно через 15 мкс).

Канал 2 таймера используется для генерации звука. Выход канала 2 — $OUT2$ — соединен с динамиком. Вход $GATE2$ канала 2 управляется битом 0 порта $61h$. Соединение/разъединение с динамиком управляется битом 1 порта $61h$. Для генерации звуковой частоты обычно используется режим 3. В этом режиме на выходе $OUT2$ появляются прямоугольные колебания, частота которых определяется начальным значением константы пересчета канала. Канал 2 может использоваться для целей отсчета времени в АС. Его можно программировать в любом режиме. Для контроля выхода $OUT2$ можно проверять бит 5 управляющего порта $61h$.

5.5.9. Примеры программирования программируемого интервального таймера в среде Borland Pascal

Программирование системного таймера ЭВМ семейства IBM (Intel 8254).

1. Инициализация канала 2 для генерации импульсов с частотой $F_2 \sim 100$ Гц в режиме 3 (меандр):

```
N2 := 1193182 div 100; {11931,82} N2 := 11931; {Вычислена кон-
станта пересчета, которая задается в виде двухбайтовой перемен-
ной.}
```

```
Минимальное значение частоты  $F_2=18,2$  Hz.
```

```
Port [$61] := Port [$61] and not 3; {Сигнал на входе
GATE2 устанавливаем в 0 и выход OUT2 отключаем от динамика.}
```

```
Port [$43] := $B6; (10 11 011 0 ; SC=10, RW=11, Mode=011 BCD=0)
{Канал 2, константа пересчета задана 2-я байтами, режим 3, фор-
мат счета двоичный.}
```

```
Фактически установлена частота  $F_{out2}=100.0068$  Гц =  $F_{clk}/N = 1193182/11931$ .
```

```
Port [$42] := Lo (N2); Port [$42]:=Hi (N2);
```

```
{Константа пересчета записана во входной регистр счетчика
последовательно: сначала младший байт, затем старший.}
```

```
Port [$61] := Port [$61] or 1;
```

```
{На входе GATE2=1 установлен разрешающий потенциал, на выходе
OUT2 началась генерация импульсов типа меандр.}
```

2. Чтение текущего содержимого счетного элемента CE таймера:

а) чтение на лету — не всегда корректное чтение.

```
Count2 := Port [$42]; Count2 := (Port [$42] shl 8) + Count2;  
{Считаны последовательно во времени: сначала младший, затем  
старший байты счетного элемента счетчика 2 в переменную  
Count2.};
```

б) чтение с приостановкой работы канала с помощью сигнала $GATE2=0$ и считывание значения выходного регистра OL :

- $Port\ \$61 := Port\ \$61\ and\ not\ 1$;

На входе $GATE2$ установлен запрещающий потенциал, приостановлена генерация импульсов, на выходе $OUT2$ установился высокий уровень;

- последовательно считываются младший, затем старший байты регистра счетчика в переменную $Count2$, как в п. а), но счет остановлен;

- $Port\ \$61 := Port\ \$61\ or\ 1$;

На входе $GATE2$ установлен разрешающий потенциал, продолжилась генерация импульсов на выходе $OUT2$;

в) чтение по команде CLO («Защелка») позволяет прочесть состояние CE в любой момент времени без остановки счета:

- $Port\ \$43 := \80 ; { $\$40$ — для канала 1, 0 — для канала 0}

Подана команда, защелкнуть текущее значение счетного элемента канала 2 в выходном регистре. Счетчик продолжает работу;

- считываются последовательно младший, затем старший байты регистра счетчика в переменную $Count2$, как в п. а).

Выходной регистр счетчика «расщелкнулся» и вновь начал сопровождать счетный элемент;

г) чтение командой «Чтение состояния»:

- $Port\ \$43 := \$D8$; {Защелкнут выходной регистр счетчика канала 2.};

- считываются последовательно младший, затем старший байты регистра счетчика в переменную $Count2$ (как в п. а)). Выходной регистр счетчика расщелкнулся и начал отображать текущее значение счетного элемента.

3. Чтение статусных регистров каналов таймера:

1) $Port\ \$43 := \EE ; {Подана команда, защелкнуть статусные регистры всех каналов в выходных регистрах состояния}

Номер	7	6	5	4	3	2	1	0
Назначение	1	1	$\neg Count$	$\neg Status$	$CNT2$	$CNT1$	$CNT0$	0
Код команды	1	1	1	0	1	1	1	0

```
Status0 := Port [$40]; Status1 := Port [$41]; Status2 := Port  
[$42];  
{Прочитано содержимое статусных регистров всех каналов таймера}
```

Номер	7	6	5	4	3	2	1	0
Назначение	<i>OUT</i>	<i>Count</i>	<i>RW</i>		<i>Mode</i>			<i>BCD</i>
Состояние бита	?	0	1 1		0 1 1			0

4. Чтение счетного элемента и статусного регистра 2-го канала таймера

```
Port[$43] := $C8 ; status2 := Port[$42] ; count2 :=
port[$42] + (port[$42] shl 8);
{Сначала читается содержимое выходного регистра состояния,
затем содержимое выходного регистра счетчика}
```

Определение начала очередного периода сигнала во 2-м канале системного таймера ЭВМ семейства *IBM*, ранее запрограммированного для генерации импульсов с периодом T_{out2} в режиме 3 со скважностью 2. Выход *OUT2* соединен с битом 5 регистра с адресом $61h$. Состояние бита в течение периода T_{out2} один полупериод равен единице, другой — нулю. Программа должна найти переход 0-1, который определяет начало очередного периода канала таймера, т. е. момент, в который должно начинаться новое измерение или выводиться очередное управляющее воздействие:

```
Procedure Wait_TimerPC; Begin While (Port [$61] AND $20) <>
0 do; {При выходе из цикла завершается 1-й полупериод меандра}
While (Port [$61] AND $20) = 0 do; {Завершается 2-й полупериод
меандра} End;
```

5.5.10. Программируемый интервальный таймер *Intel 8253 (K-580BI53) на интерфейсной карте L-154*

Для синхронизации ввода-вывода или генерирования прерываний в автоматизированной системе на основе ЭВМ семейства *IBM* подключена интерфейсная карта типа *L-154* (рис. 5.31), содержащая микросхему таймера *K-580BI53*.

Программируемый интервальный таймер на магистрали внешних устройств ЭВМ семейства *IBM* соответствуют четыре адреса (см. карту регистров *L-154*): $308h$ — канал 0, $309h$ — канал 1, $30Ah$ — канал 2, $30Bh$ — управляющий регистр. На управляющие входы *GATE* всех каналов всегда подан разрешающий потенциал, т. е. разрешен счет. На вход *CLK0* нулевого канала подключен генератор частоты $F_{clk0} = 1$ МГц.

Выход *OUT0* канала соединен с входом *CLK1* первого канала, что позволяет работать с временными интервалами от $T_{min} = 4$ мкс до $T = (65\,536 \cdot 65\,536) T_{clk}$; $T_{max} = 1$ ч 11 мин 36 с. Выход *OUT1* первого канала соединен с линией *IRi* программируемого контроллера прерываний через схему формирования запросов прерываний. Включение/отключение сигнала «запрос прерывания» (1/0) от линии *IRi* управляется младшим битом «регистра управления преры-

ваниями интерфейса» $30Fh$. Номер i генерируемого прерывания устанавливается переключкой на плате $L-154$ ($i = 3, 4, 5, 6$ или 7). Вход $CLK2$ второго канала таймера выведен на внешний разъем, что позволяет использовать аппаратную синхронизацию процессов ввода от ВУ. Выходной регистр состояния в *Intel 8253* отсутствует. Состояние выходов всех каналов $OUT0$, $OUT1$, $OUT2$ можно прочитать по адресу $302h$.

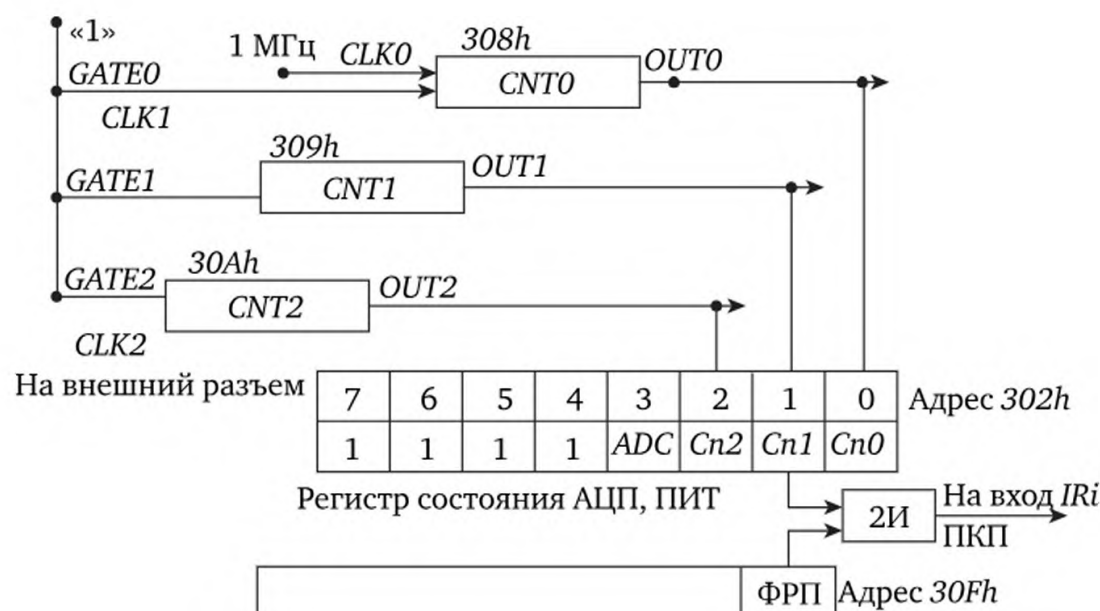


Рис. 5.31. Функциональная схема ПИТ $L-154$

Номер бита	7	6	5	4	3	2	1	0
Назначение бита	1	1	1	1	АЦП	OUT 2	OUT 1	OUT 0

Пример программирования каналов 0 и 1 ПИТ: канал 0 генерации импульсов меандр с интервалом $T_0 = 100$ мкс, $F_0 = 10\,000$ Гц. Канал 1 генерации импульсов — меандр с интервалом $T_1 = 5000$ мкс, $F_1 = 200$ Гц. Число N_0 , загружаемое в счетчик нулевого канала (константа пересчета) и период T_{OUT0} , мкс, на выходе $OUT0$ связаны соотношением

$$T_{OUT0} = T_{CLK0} \cdot N_0 = 100 \text{ мкс},$$

где $T_{CLK0} = 1$ мкс.

Следовательно, константа пересчета $N_0 = T_{OUT0}/T_{CLK0} = 100$. Константа пересчета для 1 канала определяется аналогично:

$$N_1 = T_{OUT1}/T_{CLK1} = T_{1\,OUT}/T_{0\,OUT} = 5000/100 = 50.$$

Если изменить период сигнала на выходе канала 0, то изменится период на выходе 1-го канала.

Номер бита	7	6	5	4	3	2	1	0
Обозначение бита	SC		RW		MODE			BCD

```

Program PIT_init;
var N0, N1: word;
begin
N0:= 100; N1:=50; {Определяются значения констант пересчета.}
Port[$30B]:= $16; {00 01 011 0 → SC=00, RW=01, MODE=011, BCD=0}
{Программируется канал 0: режим 3 – генератор меандра, кон-
станта пересчета задается одним байтом в двоичном коде.}
Port [$30B]:= $56; {01 01 011 0 → SC=01, RW=01, MODE=011 BCD=0}
{Программируется канал 1: режим 3 – генератор меандра, кон-
станта пересчета задается одним байтом в двоичном коде.}

```

Сначала устанавливаются режимы работы обоих каналов, затем записываются константы пересчета:

```

Port [$308]:= N0;
{Константа пересчета загружается во входной регистр CR канала
0.}
Port [$309]:= N1;
{Константа пересчета загружается во входной регистр CR канала
1.}
end.

```

После выполнения фрагмента программы канал 0 таймера на выходе *OUT0* начинает генерировать импульсы типа меандр с периодом $T_0 = 100$ мкс, а канал 1 таймера — аналогичные импульсы с периодом 5 мс. Для изменения периода сигнала любого канала следует в его входной регистр *CR* загрузить новое значение константы пересчета *N*. Если изменить период на выходе канала 0, то изменится и период на выходе канала 1 ПИТ.

5.6. Многоканальный режим измерения сигналов (основные понятия)

Часто бывает необходимо считывать информацию с нескольких датчиков объекта автоматизации. Если при наступлении определенного момента времени программа должна опрашивать не один, а несколько измерительных каналов то необходимо организовать многоканальный ввод или вывод данных. Временные диаграммы для шести измерений в цикле приведены на рис. 5.32.

По оси абсцисс отложено время *t*. Вертикальные линии отмечают моменты времени, когда происходит считывание мгновенного значения напряжения соответствующего канала. Процесс считывания сигналов с нескольких каналов, образованных пользователем, называют *сканированием*. Набор, состоящий из выборок, по одной для каждого канала называется *циклом сканирования*. Интервал

времени между соседними циклами сканирования называется периодом сканирования — $T_{СК}$. Данные в каждом канале снимаются с интервалом $T_{СК}$. Интервал времени между считываниями данных из соседних каналов в цикле сканирования определяет каналный интервал — $T_{КАН}$. Число отсчетов в цикле сканирования называется размер кадра.

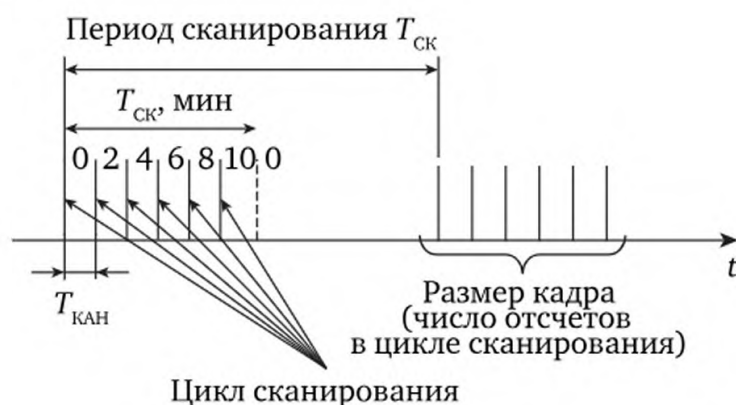


Рис. 5.32. Временные диаграммы многоканальных измерений

Набор выборок из одного и того же канала во времени называется *осциллограммой сигнала*. При многоканальных измерениях, для восстановления формы и параметров входных сигналов во времени, необходимо контролировать:

- период сканирования $T_{СК}$ или частоту сканирования $f_{СК} = 1/T_{СК}$;
- канальную задержку — $T_{КАН}$, т. е. интервалы между измерениями в каждом кадре.

Выборки каждого из каналов, как правило, записываются в одномерные массивы. Элементы выборок получают номера выборок (0, 1, 2, ..., $n - 1$). В массивах всех каналов записано по n элементов, численные значения которых равны напряжению выборок канала с индексами (номера) от 0 до $n - 1$. Время считывания в каждом канале одно и то же и равно $(n - 1) \cdot T_{СК}$. Однако реальное время всех выборок каждого следующего канала сдвинуто на интервал $T_{КАН}$ по сравнению с соответствующими выборками предыдущего канала. Поэтому даже при абсолютно одинаковых синхронных сигналах по всем каналам элементы с одинаковыми номерами (индексами в массивах) будут различаться. Сказанное выше следует учитывать, например, при исследовании фазовых соотношений реальных сигналов.

Реализация многоканальных измерений. Многоканальные измерения можно реализовать с помощью 0-го и 1-го каналов ПИТ L-154. Каналы 0 и 1 ПИТ L-154 позволяют установить:

- период сканирования $T_{СК} = T_{OUT1}$;
- канальную задержку $T_{КАН} = T_{OUT0}$.

При реализации многоканальных измерений по готовности необходимо:

- 1) найти момент начала цикла сканирования. Проверяется бит 1 регистра состояния с адресом $302h$, соответствующий $OUT1$;
- 2) выполнить измерения по всем выбранным каналам (вместо одного измерения). После каждого измерения определять момент начала очередного измерения в цикле, контролируя сигнал T_{KAN} на выходе нулевого канала таймера $OUT0$. Для этого проверяется бит 0 регистра состояния с адресом $302h$, соответствующий $OUT0$;
- 3) повторить указанные действия заданное число циклов $N_{СК}$.

При реализации многоканальных измерений по прерыванию момент начала каждого цикла сканирования определяется запросом прерывания от канала 1 ПИТ. Далее для каждого ЗП снимается кадр отсчетов по всем каналам с интервалом T_{KAN} , определяемым каналом «0» $OUT0$.

5.7. Обмен данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами в режиме прямого доступа к памяти

Принципы организации обмена. Метод передачи данных между оперативной памятью (ОЗУ) ЭВМ и ВУ без участия процессора получил название прямого доступа к памяти (ПДП). Аппаратные средства реализации обмена в режиме ПДП называются контроллером ПДП (КПДП) (рис. 5.33). В большинстве микропроцессорных семейств имеются однокристалльные контроллеры.

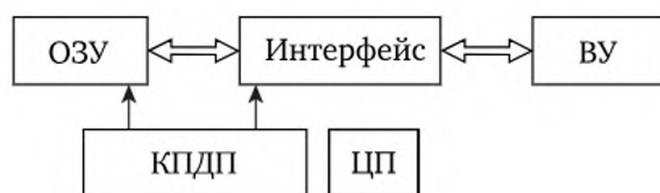


Рис. 5.33. Передача данных между ОЗУ ЭВМ и внешним устройством в режиме ПДП

Контроллеры ПДП — сложные МП устройства, поэтому при относительно небольшой скорости обмена данными между ЭВМ и ВУ их взаимодействие организуется с помощью одного из методов программно управляемого обмена. Непосредственное взаимодействие ВУ с памятью ЭВМ требуется, если программа обмена занимает времени больше, чем это допустимо, или желательно передавать большие объемы данных с максимально возможной скоростью. Обмен данными в режиме ПДП реализуется за один цикл шины.

Цикл шины — действия, обеспечивающие передачу по системной шине байта или слова данных. Это максимально достижимая скорость обмена. В течение любого цикла шины системной магистралью ЭВМ управляет одна из подключенных к ней компонент. Эта компонента в течение данного цикла называется ведущей, а компонента, с которой она взаимодействует, называется ведомой. Ведущим, обычно, является ЦП, но и другие устройства ЭВМ, в частности КПДП, могут получить управление магистралью и становятся ведущими.

При использовании ПДП процессор не участвует в операциях обмена данными. Управляет обменом контроллер ПДП, который формирует все сигналы управления магистралью, необходимые для обмена данными по магистрали. Чтобы получить управление магистралью, контроллер ПДП посылает сигнал «Запрос шины» в ЦП. После завершения текущего цикла шины процессор отключается от магистрали ЭВМ. Контроллер ПДП становится ведущим и остается им до снятия своего сигнала «Запрос шины». Контроллер ПДП сам определяет, когда снять сигнал запроса шины. Он может вернуть управление ЦП после передачи одного байта (или слова) данных, а при готовности следующего байта (слова) вновь запросить управление или управлять шиной до завершения передачи целого блока данных. Если применяется первый способ, то процессор может продолжить свои действия до готовности следующего слова данных (рис. 5.34).



Рис. 5.34. Временная диаграмма обмена данными в режиме ПДП для блочного обмена и обмена одиночными словами

5.7.1. Функциональная схема соединения компонентов системы при выполнении обмена ПДП и алгоритм их взаимодействия

Интерфейс с ВУ связан с ВУ и системной шиной теми же сигналами, что и при программном способе обмена данными (рис. 5.35). Никаких новых связей интерфейса ВУ с этими компонентами нет. Интерфейс ВУ связан с КПДП следующими сигналами:

- запрос ПДП (DREQ — *direct memory access request*);
- разрешение ПДП (DACK — *DMA acknowledge*) — или подтверждение ПДП;
- конец передачи (EOP — *end of process*).



Рис. 5.35. Функциональная схема соединения компонентов системы при выполнении обмена ПДП

В программном режиме работы с процессором КПДП выступает как обычное ведомое ВУ и получает по магистрали ЭВМ сигналы управления от ЦП.

В режиме ПДП КПДП должен управлять магистралью ЭВМ. Для управления системной магистралью ЭВМ КПДП связан как ведущее устройство с шиной адреса и шиной управления. С процессором КПДП связан следующими сигнальными линиями:

- запрос шины (системной магистрали) *HOLD*;
- разрешение шины (магистрали) *HLDA* (*hold acknowledge*).

Алгоритм обмена ПДП. Инициатором обмена, как и при обмене с прерыванием программы, выступает ВУ. Предположим, что данные должны передаваться из ВУ в ОЗУ ЭВМ. Обмен реализуется следующей последовательностью действий интерфейса, ВУ, КПДП и ЦП:

- 1) ВУ при готовности к обмену передает данные и сигнал готовности в интерфейс ВУ;
- 2) интерфейс ВУ посылает сигнал «Запрос ПДП» (*DREQ*) в КПДП;
- 3) КПДП формирует сигнал «Запрос шины» (*HOLD*) процессору;
- 4) процессор отвечает сигналом «Разрешение шины» (*HLDA*) контроллеру ПДП и отключается от шин магистрали. Не отключается от линий «Запрос шины» и «Разрешение шины». КПДП становится ведущим, т. е. должен управлять ША и ШУ:

- КПДП посылает сигнал «Разрешение ПДП» (*DACK*) в интерфейс ВУ, разрешая ВУ начать обмен данными. Сигналом *DACK* («Разрешение ПДП») КПДП косвенно адресует ВУ, так как ША должна использоваться для адресации ОЗУ;
- КПДП помещает адрес ячейки памяти на шину адреса магистрали ЭВМ, т. е. адресует ячейку памяти;
- КПДП устанавливает на шину управления два сигнала управления: «Вывод из ВУ»/«Запись в ОЗУ» (*IOR/MEMW*) на шину управления или «Чтение из ОЗУ»/«Ввод во ВУ» (*MEMR/IOW*).

Таким образом, все сигналы для выполнения цикла шины будут установлены КПДП на магистраль, т. е. указаны два адреса и два

сигнала управления. Под воздействием указанных сигналов байт (или слово) данных передается непосредственно между ячейкой ОЗУ и регистром данных интерфейса ВУ. Блочный обмен представляет собой последовательность рассмотренных передач. В каждом следующем цикле обмена используется смежная ячейка памяти. Контроллер прямого доступа к памяти своими аппаратными средствами должен изменить адрес ячейки ОЗУ на 1;

5) контроллер прямого доступа к памяти снимает сигнал «Запрос шины» (*HOLD*) и управление возвращается к ЦП;

6) процессор снимает сигнал «Разрешение шины» (*HLDA*) и возобновляет управление магистралью. По завершении передачи указанного контроллеру блока данных КПДП формирует сигнал «Конец передачи» (на линию *EOP*), который текущая программа может использовать для обнаружения момента завершения обмена.

5.7.2. Программная модель КПДП и интерфейса внешнего устройства

Включает элементы КПДП и интерфейса ВУ в минимальном объеме необходимые для управления обменом ПДП (доступные прикладной программе).

Интерфейс ВУ должен содержать:

- 1) регистр управления (РУ);
- 2) регистр состояния (РС);
- 3) регистры данных (РД).

Регистр управления интерфейса ВУ позволяет указать:

- тип цикла ПДП по отношению к ВУ (ВВОД во ВУ или ВЫВОД из ВУ);
- момент начала обмена.

7	6	5	4	3	2	1	0	РУ интерфейса ВУ
	1/0			1/0				
				Тип цикла ПДП по отношению к ВУ: Вывод из ВУ/ввод во ВУ				
				Начать ПДП: Разрешено/запрещено				

Бит «Тип цикла ПДП» программно устанавливается/сбрасывается для указания направления передачи по отношению к ВУ. Бит «Начать ПДП» служит для инициирования начала обмена ПДП. Программная установка бита «Начать ПДП» приводит к формированию сигнала *DREQ*, если ВУ готово начать обмен данными. Бит «Начать ПДП» сбрасывается сигналом на линии *EOP*.

Регистр состояния интерфейса ВУ фиксирует состояние ВУ перед началом обмена данными и в процессе выполнения обмена.

7	6	5	4	3	2	1	0	РУ интерфейса ВУ
1/0						1/0		

Флаг готовности:
ВУ готово/занято

Состояние обмена ПДП
(бит «Закончено»):
обмен завершен/выполняется.
КПДП закончил передачу
блока данных

Обмен данными в режиме ПДП может начаться, если:

- программа установит бит «Начать» в РУ интерфейсом в «1»;
- ВУ установит «Флаг Готовности» в РС интерфейса в «1».

Бит «Закончено» информирует о завершении обмена ПДП. Бит «Закончено» устанавливается сигналом на линии *EOP*, сбрасывается при установке бита «Начать» РУ интерфейсом.

Регистр данных интерфейса ВУ служит для буферного хранения данных, передаваемых между ВУ, интерфейсом и ОЗУ. Могут использоваться несколько регистров для входных и выходных данных.

Программная модель КПДП включает: регистр управления (РУ), регистр состояния (РС), регистр счетчик слов или байт (Рсч), регистр адреса (РА).

Регистр управления КПДП позволяет установить:

- режим обслуживания ВУ (блоковая или одиночная передача);
- тип цикла ПДП по отношению к ОЗУ (запись в ОЗУ или чтение из ОЗУ);
- разрешение работы КПДП для указания момента начала передачи данных в режиме ПДП.

7	6	5	4	3	2	1	0	РУ КПДП
	1/0		1/0		1/0			

Тип цикла ПДП по отношению к ОЗУ:
чтение/запись

Разрешение КПДП: разрешить/запретить

Режим обслуживания: блочный/одиночный обмен

Бит «Режим обслуживания» устанавливается в «1», если требуется блочная передача, иначе сбрасывается в «0». Бит «ТИП Цикла ПДП» указывает направление передачи данных по отношению к ОЗУ. Бит «Разрешение ПДП» разрешает КПДП формировать сигнал *HOLD* «Запрос шины» в ЦП.

РС КПДП:

7	6	5	4				3	2	1	0
			Состояние обмена ПДП: 1/0 — завершен/выполняется							

Бит «Состояние обмена ПДП» устанавливается в «1» после передачи последнего байта данных по каналу ПДП сигналом ВУ на линии ЕОР. Сбрасывается после чтения РС процессором.

Регистр счетчик слов или байт КПДП служит для управления длиной массива данных, передаваемых в режиме ПДП. В РСч до начала обмена ПДП записывается число байт (или слов) требуемое для обмена ПДП.

Регистр адреса КПДП служит для указания текущего адреса ячейки памяти, с которой будет выполняться очередной цикл обмена данными. В РА КПДП до начала обмена ПДП записывается адрес ячейки ОЗУ, с которой будет выполняться обмен. После передачи каждого слова (байта), содержимое РА инкрементируется или декрементируется для указания адреса следующей ячейки ОЗУ, а содержимое РСч обычно декрементируется на «1» аппаратными средствами КПДП. Таким образом, в режиме ПДП используются смежные ячейки ОЗУ.

Когда содержимое РСч достигает конечного значения, на линии «Конец Передачи» КПДП (ЕОР) появляется активный уровень сигнала. Сигнал «Конец Передачи» может устанавливаться и ВУ при ошибках передачи или невозможности продолжать обмен данными. Сигналом на линии «Конец Передачи» сбрасывается бит «Начать ПДП» в РУ интерфейса ВУ и устанавливаются биты «Состояние обмена ПДП» в регистрах состояния КПДП и интерфейса ВУ.

Текущая программа может обнаружить конец передачи блока данных, периодически проверяя бит «Состояние обмена ПДП» в РС КПДП или в РС интерфейса ВУ. Сигнал на линии ЕОР («Конец Передачи») часто используется для инициирования прерывания текущей программы ЦП и установки признаков окончания обмена данными по каналу ПДП или обнаруженных ошибок в передаче.

Регистры состояния, РА и РСч интерфейса ВУ и КПДП во время передачи могут фиксировать важную информацию, в частности об ошибках передачи, завершении обмена.

После завершения передачи блока данных или аварийного прекращения обмена, специальная процедура должна проверить содержимое регистров КПДП и интерфейса ВУ и предпринять соответствующие действия, например: вывод сообщений об ошибках или инициирование повторной передачи.

Процедура, проверяющая состояние регистров КПДП и интерфейса ВУ после завершения передачи данных по каналу ПДП, называется процедурой завершения.

5.7.3. Методика запуска обмена по каналу ПДП

Контроллер прямого доступа к памяти имеет два режима работы:

1) программный режим работы с ЦП, когда контроллер ПДП выступает в качестве ведомого ВУ. В программном режиме ЦП может

обращаться к КППДП как к обычному ВУ, т. е. читать содержимое регистров КППДП и записывать в них управляющую информацию;

2) режим выполнения операций ПДП, когда контроллер выступает в качестве ведущего. В этом режиме КППДП сам управляет магистралью и недоступен для ЦП.

Для запуска операции обмена по каналу ПДП, ЦП должен в программном режиме:

- проверить состояние ВУ;
- выполнить начальную установку регистров интерфейса ВУ и КППДП.

Состояние ВУ показывает ФГ в регистре состояния интерфейса ВУ.

Начальная установка регистров интерфейса ВУ включает установку в РУ:

1) направления передачи данных по отношению к ВУ (бит «Тип цикла ПДП»);

2) бита «Начать ПДП», разрешая ВУ устанавливать сигнал *DREQ*. *Начальная установка КППДП* включает следующие действия:

1) в Рсч КППДП — указывается размер блока данных;

2) в РА КППДП — указывается начальный адрес ОЗУ;

3) в РУ КППДП — устанавливаются параметры обмена: «Режим Обслуживания», «Тип Цикла ПДП» и устанавливается бит «Работа КППДП разрешена»:

- бит «Режим обслуживания» определяет блочный обмен или одиночный обмен;

- бит «Тип Цикла ПДП» определяет направление передачи данных по отношению к ОЗУ;

- бит «Работа КППДП разрешена» разрешает КППДП реагировать на сигнал *DREQ* от ВУ и посылать в ЦП сигнал *HOLD* «Запрос Шины».

Бит «Начать ПДП» в РУ интерфейса должен устанавливаться последним, так как его установка запускает операции ввода-вывода данных по каналу ПДП. После начальной установки регистров КППДП и интерфейса ВУ, начинается непосредственный обмен данными между РД интерфейса ВУ и ячейками ОЗУ без участия ЦП.

Контроллер прямого доступа к памяти запрашивает управление шиной и выполняет циклы обмена данными. После передачи каждого элемента данных КППДП своими аппаратными средствами производит декремент Рсч и инкремент (или декремент) РА. Обмен продолжается до момента, когда содержимое Рсч КППДП становится равно конечному значению:

- в РС КППДП и интерфейса ВУ устанавливаются биты «Состояние обмена ПДП»;

- в РУ интерфейса ВУ сбрасывается бит «Начать ПДП».

Новый цикл обмена может начаться только после начальной установки регистров.

5.7.4. Реализация ПДП в электронно-вычислительных машинах на основе единого магистрального канала обмена данными

В ЭВМ на основе единого магистрального канала обмена данными к линии «Запрос шины» может быть параллельно подключено несколько ВУ, обладающих способностью работать в режиме ПДП (рис. 5.36). В этом случае линия «Разрешение шины» проходит последовательно через все устройства ПДП, аналогично линии «Разрешение прерывания».

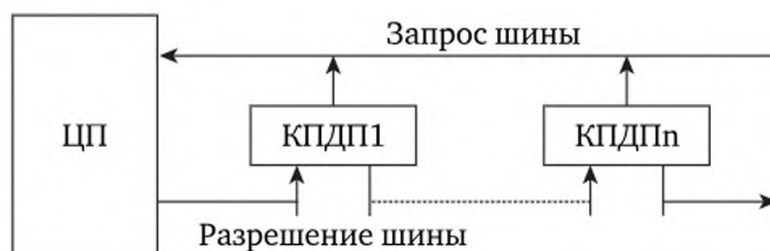


Рис. 5.36. Схема идентификации источника запроса в ЭВМ на основе единого магистрального канала

Иными словами, сигналы РШ формируются гирляндным способом. Контроллерам ПДП, использующим совместно одну линию ЗШ, приоритеты назначаются в соответствии с их местоположением. Контроллеры прямого доступа к памяти, расположенные физически ближе к ЦП, имеют больший приоритет среди аналогичных устройств. Ближайший к ЦП КПДП, поглощает сигнал «Разрешение шины» и захватывает управление магистралью.

В ЭВМ на основе магистрали VME-bus имеются:

- четыре линии «Запрос Шины» ЗШ0—ЗШ3;
- четыре линии «Разрешение Шины» РШ0—РШ3.

Аппаратные средства каждого контроллера ПДП позволяют его подключить к любой паре линий «Запрос Шины» — «Разрешение Шины». При получении сигнала ЗШк арбитр ЦП отвечает выдачей сигнала по линии РШк, соответствующей уровню запроса. Когда текущий задатчик освобождает магистраль, арбитр отвечает на запрос высшего приоритета.

В ЭВМ на основе магистрали VME-bus арбитр ЦП позволяет КПДП может работать в одном из трех режимов:

- 1) с фиксированными приоритетами;
- 2) циклически изменяемыми приоритетами;
- 3) обслуживание запросов ВУ единственного уровня.

В режиме с фиксированным приоритетом каждой паре линий ЗШк—РШк присваивается фиксированный приоритет от высшего ЗШ3 до низшего ЗШ0. В режиме циклических приоритетов, после обслуживания очередного запроса с линии ЗШк, соответствующей

линии присваивается низший приоритет, а запросы остальных линий изменяются в круговом порядке.

В режиме обслуживания запросов ВУ единственного уровня обслуживаются запросы на линии ЗШЗ. В любом режиме обслуживания, как только задатчик захватывает магистраль, отобрать у него управление невозможно до тех пор, пока он не снимет свой сигнал ЗШ. Основная особенность такой схемы обслуживания запросов от ВУ в том, что приоритеты ВУ устанавливаются аппаратными средствами.

5.7.5. Реализация ПДП в электронно-вычислительных машинах на основе изолированных каналов обмена данными (семейство IBM)

Для реализации обмена данными в режиме ПДП в ЭВМ семейства *IBM AT* используется КПДП на основе программируемой интерфейсной БИС фирмы *Intel* типа 8237A (ее отечественный аналог К1810 ВТ 37А). Для восьмиразрядного микропроцессора *Intel* 8080 используется БИС *Intel* 8257 (ее аналог КР580 ВТ 57).

Основные характеристики КПДП:

- 1) число каналов ПДП — 4. Каждый контроллер ПДП позволяет управлять работой до четырех каналов ПДП с помощью линий *DREQ0—DREQ3*, *DACK0—DACK3*. К каждому каналу можно подключить одно ВУ. Для увеличения числа каналов ПДП можно использовать каскадирование контроллеров;
- 2) число контроллеров ПДП в ЭВМ семейства *IBM-2*. В ЭВМ семейства *IBM* имеются два каскадно-включенных КПДП:
 - КПДП1 передает 8-разрядные данные,
 - КПДП2 передает 16-разрядные данные;
- 3) максимальное число циклов ПДП без перепрограммирования в каждом канале КПДП — 64 К циклов (65 536);
- 4) максимальная скорость передачи данных — 1,6 Мбайт/с.

5.7.6. Режимы работы контроллера ПДП

Каждый КПДП может быть запрограммирован для обслуживания запросов:

- с фиксированными приоритетами каналов;
- с циклическим изменением приоритетов каналов.

При фиксированных приоритетах, наивысший приоритет устанавливается за каналом с меньшим номером *DREQ0*. При циклическом изменении приоритетов каналов, самый низкий приоритет присваивается каналу после его обслуживания (аналогично ПКП). Это позволяет обслужить все каналы поочередно. Имеется возможность автоматической инициализации каналов КПДП, т. е. повторения циклов ПДП с единожды установленными параметрами, без перепрограммирования. Наряду с обслуживанием ВУ КПДП позволяет реализовать передачу «память — память».

5.7.7. Схема связи КПП с внешним устройством, центральным процессором, системной шиной и назначение выводов большой интегральной схемы

Назначение выводов связи БИС КПП с системной шиной ЭВМ меняется в зависимости от режима его работы (программный или ПДП) (рис. 5.37).

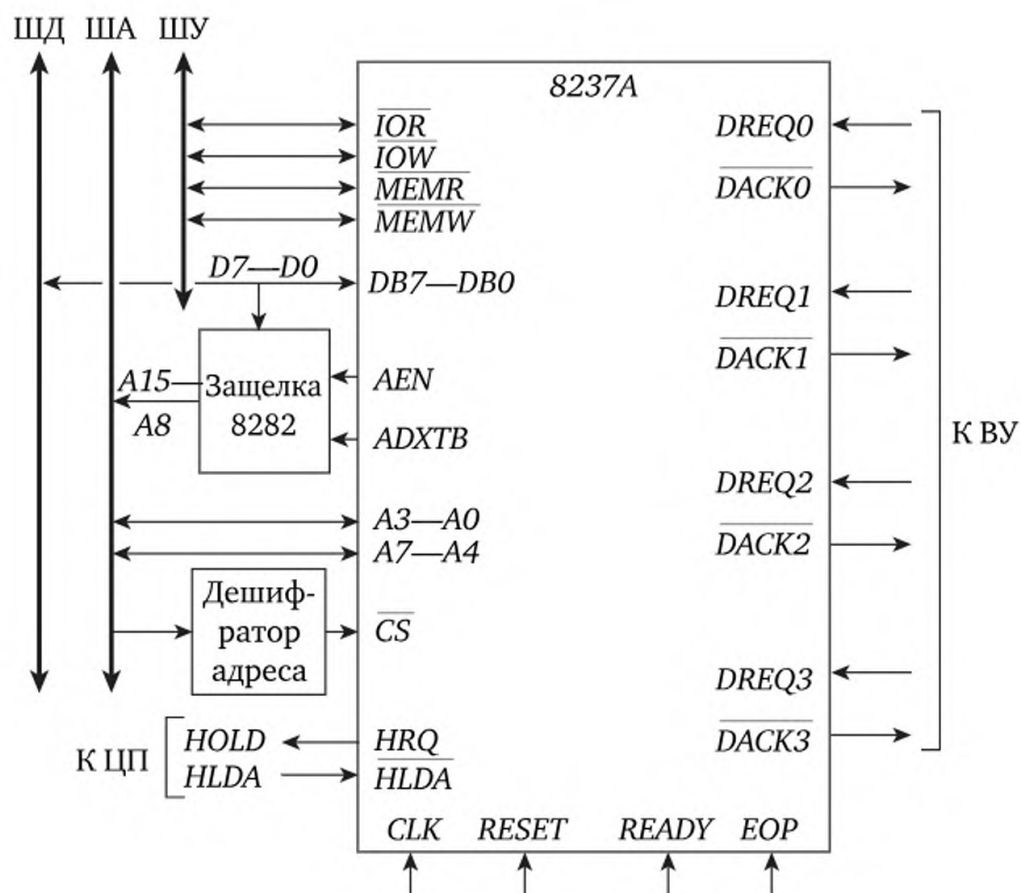


Рис. 5.37. Схема связи КПП фирмы Intel с системной шиной, ЦП и ВУ

Выводы $DB7-DB0$ — линии данных двунаправленные. В программном режиме работы линии $DB7-DB0$ служат для приема управляющей информации от процессора или для передачи статусной информации в процессор по линиям ШД $D7-D0$. В режиме ПДП на выводы $DB7-DB0$ контроллер ПДП выдает восемь разрядов адреса ОЗУ, которые необходимо защелкнуть во внешнем регистре-защелке (Intel 8282). Выходы регистра-защелки подключаются к адресным линиям $A15-A8$ магистрали ЭВМ. В режиме ПДП контроллер не управляет ШД, и соответствующие выводы шины данных $DB7-DB0$ контроллера свободны. Выводы $A3-A0$ — адресные входы-выходы. В программном режиме работы КПП, выводы $A3-A0$ используются как входы для адресации регистров КПП.

Контроллер прямого доступа к памяти в программном режиме использует 16 адресов в адресном пространстве ввода-вывода. В ре-

жиме ПДП выходы АЗ—А0 используются как выходы, по ним передаются четыре младших разряда адреса ОЗУ, которые выводятся на адресные линии АЗ—А0 магистрали ЭВМ.

Выходы А7—А4 — адресные выходы. В программном режиме работы КПДП выходы А7—А4 не используются, переходят в высокоимпедансное состояние. В режиме ПДП контроллер на выходы А7—А4 передает соответствующие разряды адреса ОЗУ.

Таким образом, в режиме ПДП контроллер выдает на ША только 16 разрядов адреса. Но в режиме ПДП при работе с памятью ЭВМ контроллер должен использовать как минимум 24-разрядные адреса памяти. Младшие 16 бит адреса выводятся контроллером на шину адреса ЭВМ. Старшие биты адреса контроллер не выдает, и их необходимо программировать до начала передачи ПДП.

Для хранения старших бит адреса используется специальный регистр страниц (табл. 5.6). В программном режиме работы КПДП в регистр страниц можно вывести данные как в любой порт. Во время передачи по каналу ПДП содержимое регистра страниц изменять нельзя. Следовательно, за одну передачу можно передать максимум $2^{16} = 65\,536$ байт, так как КПДП может менять адрес в пределах младших 16 разрядов.

Таблица 5.6

Назначение каналов КПДП и адреса регистров страниц

Номер КПДП	Номер канала	Назначение канала	Адрес регистра страниц
1	0	Резерв (регенерация ОЗУ)	87h
	1	Резерв	83h КАМАК. Sound
	2	НГМД	81h
	3	Резерв	82h
2	4	Каскадирование	—
	5	Резерв	8Bh Sound
	6	Резерв	89h
	7	Резерв	8Ah

Из регистра страниц данные выводятся на линии А16—А23 ША. Вывод $\neg CS$ — выбор кристалла связан с ША посредством дешифратора адреса и определяет базовый адрес КПДП в адресном пространстве ввода-вывода ЭВМ. В программном режиме работы с ЦП вывод $\neg CS$ используется как вход, разрешает связь КПДП с системной шиной (если «0») или запрещает (если «1»). В режиме ПДП $\neg CS$ не используется, переходя в высокоимпедансное состояние.

В программном режиме базовые адреса регистров контроллеров, в области адресов ввода-вывода, соответственно равны:

- 1-й КППД $0h$ ($0 \dots Fh$),
- 2-й КППД $C0h$ ($C0h \dots DFh$).

Выводы $\neg MEMR/\neg MEMW$ — чтение/запись в программном режиме работы не используются, переходя в высокоимпедансное состояние. В режиме ПДП выводы $\neg MEMR/\neg MEMW$ используются как выходы, определяют направление передачи данных по отношению к ОЗУ.

Выводы $\neg IOR/\neg IOW$ — вывод/ввод в программном режиме работы используются как входы для чтения ($\neg IOR = 0$) или записи ($\neg IOW = 0$) регистров контроллера. Выводы $\neg IOR/\neg IOW$ в режиме ПДП используются как выходы, указывают ВУ, установившему запрос ПДП, направление передачи данных по отношению к ВУ: или из регистров данных интерфейса ($\neg IOR = 0$) или в регистры данных интерфейса ($\neg IOW = 0$).

Вывод *AEN* (*address enable*) — разрешение адреса, в режиме ПДП показывает, что на ШД установлен адрес. В программном режиме работы вывод *AEN* переходит в высокоимпедансное состояние. В режиме ПДП вывод *AEN* используется, как выход. Вывод *AEN* устанавливается в «1» ($AEN = 1$) на время выдачи восьми старших разрядов адреса ОЗУ на линии *DB7—DB0*.

Вывод *ADSTB* (*address strobe*) — строб адреса. В программном режиме работы переходит в высокоимпедансное состояние. В режиме ПДП *ADSTB* используется как выход. На нем формируется импульс (строб), осуществляющий запись старших разрядов адреса ОЗУ (*A15—A8*) с линий *DB7—DB0* в регистр-защелку.

Вывод *HRQ* (*hold request*) — запрос шины (выход). В режиме ПДП используется для формирования требования к ЦП (по линии *HOLD*) передать управление системной магистралью КППД.

Вывод *HLDA* (*hold acknowledge*) — подтверждение шины (вход). Центральный процессор использует вывод *HLDA* для сообщения контроллеру ПДП о возможности выполнения циклов ПДП.

Вывод *CLK* — синхронизация служит для подключения тактового генератора $F_{clk} = 3\text{МГц}$.

Вывод *RESET* — сброс переводит контроллер в исходное состояние и маскирует все запросы ПДП от внешних устройств.

Вывод *READY* — готовность. В программном режиме работы переходит в высокоимпедансное состояние. В режиме ПДП может использоваться (как вход) для синхронизации работы контроллера ПДП с медленно действующими устройствами. Низкий уровень на входе *READY*, установленный ВУ, задерживает цикл ПДП.

Вывод $\neg EOP$ — окончание процесса. В режиме ПДП КППД формирует на линии *EOP* импульс при достижении счетчиком циклов ПДП конечного значения (–1), который может служить запросом прерывания и подается в интерфейс ВУ для установки признаков

завершения обмена. Интерфейс ВУ может выдать на эту линию сигнал с активным уровнем (0), который свидетельствует о невозможности устройства продолжать обмен данными. В любом случае активный уровень сигнала на линии $EOP = 0$ завершает передачу ПДП.

Выводы $DREQ0$ — $DREQ3$ — входы запросов ПДП от внешних устройств. В исходном состоянии $DREQ0$ имеет наивысший приоритет, $DREQ3$ — низший.

Выводы $DACK0$ — $DACK3$ — выходы сигналов подтверждения ПДП. Используются для сообщений ВУ о возможности выполнения циклов ПДП. Полярность сигналов запросов и подтверждения задается программно. После сигнала $RESET$ на выводах $DACK$ устанавливается пассивный уровень.

5.7.8. Функциональный состав и программная модель контроллера ПДП

В контроллере прямого доступа к памяти имеются три функциональных блока (рис. 5.38):

- 1) блок управления контроллером (БУК) (верхняя часть рисунка);
- 2) четыре канала (0, 1, 2, 3) обмена данными в режиме ПДП (регистры канала показаны для канала 0) (нижняя часть рисунка);
- 3) буферный регистр (8-разрядный) для временного хранения данных при передаче «память — память» (средняя часть рисунка).



Рис. 5.38. Программная модель КПП

Блок управления контроллером предназначен:

- 1) для установки общих для всех каналов параметров работы контроллера;

- 2) разрешения или запрета работы каналов;
- 3) чтения информации о состоянии каналов.

Блок управления контроллером содержит два 8-разрядных регистра: регистр управления, регистр состояния и два 4-разрядных: регистр маски и регистр запросов.

Регистр управления 8-разрядный (адрес $8h$), процессору доступен для записи, определяет общие для всех каналов параметры работы КППД (рис. 5.39).



Рис. 5.39. Регистр управления КППД

Назначение отдельных разрядов регистра управления:

- бит 0 определяет режим работы КППД: «память — память» («1») или «память — ВУ» («0»);
- бит 1 используется для запрета/разрешения («1/0») изменения адреса источника только в режиме «память — память». Запрет изменения адреса источника позволяет заполнить массив ОЗУ константой. В режиме «память — ВУ» состояние этого бита безразлично;
- бит 2 применяется для запрета/разрешения («1/0») работы КППД;
- бит 3 используется для сжатия во времени циклов ПДП, при изменении адреса в пределах одного младшего байта — сжимать/не сжимать («1/0»);
- бит 4 определяет приоритеты работы каналов — («1/0») циклические (круговые)/фиксированные. Если приоритеты фиксированы, то канал 0 имеет высший приоритет, а канал 3 — низший. Если установлен режим циклических приоритетов, то последний обслуженный канал имеет низший приоритет;

- бит 5 определяет цикл записи удлиненный или обычный («1/0»). Значение бита 5 = «1» показывает, что сигналы в линиях *IOW*, *MEMW* расширяются на два такта синхронизации. При выполнении циклов ПДП, сигналы *MEMR/IOW* или *IOR/MEMW* выдаются одновременно, т. е. за такт необходимо и считать, и записать данные;

- бит 6 устанавливает уровень активности сигналов *DREQ* — низкий («1») или высокий («0»);

- бит 7 устанавливает уровень активности сигналов *DACK* — высокий («1») или низкий («0»). При включении системы *BIOS* инициализирует регистр управления в 00000000 и тем самым устанавливает режим работы КПП: «память — ВУ», работа КПП разрешена, временной цикл обычный (не сжатый), приоритеты каналов фиксированные, цикл записи нормальный (не удлиненный), активные уровни сигнала (*DREQ* — высокий, *DACK* — низкий).

В процессе работы системы изменять режим работы контроллера не требуется и не рекомендуется, если не используется режим «память — память».

Регистр состояния КПП (рис. 5.40) 8-разрядный, адрес *8h* фиксирует состояния Регистров счетчиков четырех каналов и наличие запросов ПДП каналов. Процессору регистр состояния доступен для чтения.

7	6	5	4	3	2	1	0	
<i>RQ3</i>	<i>RQ2</i>	<i>RQ1</i>	<i>RQ0</i>	<i>TC3</i>	<i>TC2</i>	<i>TC1</i>	<i>TC0</i>	Terminal Count
								Завершение ПДП $TC_i = 1$ (в канале i)
								Запросы ПДП каналов $RQ_i = 1$, есть запрос $DREQ_i$ (в канале i)

Рис. 5.40. Регистр состояния КПП

Назначение отдельных разрядов регистра состояния:

- биты 3—0 — TC_i устанавливаются в «1» при достижении счетчиками каналов 3—0 конечных значений или по внешнему сигналу *EOP*. Сбрасываются TC_i после чтения регистра состояния или по сигналу *RESET*. Конечное значение регистра счетчика канала (Рсч *FFFFh*) равно -1, следовательно, до начала обмена ПДП необходимо записать в регистр-счетчик значение $N-1$;

- биты 7—4 RQ_i устанавливаются в «1», если имеется запрос ПДП каналов 3—0 на линиях *DREQ*.

3	2	1	0	
<i>M3</i>	<i>M2</i>	<i>M1</i>	<i>M0</i>	Адрес <i>Fh</i>

Регистр маски 4-разрядный (адрес Fh), ЦП доступен для записи, используется для одновременного маскирования или разрешения запросов ПДП в каждом канале. С помощью этого регистра можно установить или сбросить маски в каждом канале. Биты 0—3 этого регистра соответствуют номерам каналов ПДП контроллера. Установка в «1» $Mi = 1$ или сброс в «0» $Mi = 0$ отдельных разрядов регистра маски приводит к запрету/разрешению работы соответствующего канала КПДП. После достижения счетчиком канала конечного значения маска устанавливается в единицу ($Mi = 1$), если не запрограммирован режим автоинициализации канала. Регистр маски не доступен ЦП для чтения, следовательно, нельзя записать в выбранные разряды регистра маски, сохранив состояния остальных разрядов. Разрешение/запрет определенного канала ПДП может выполняться командой записи по адресу Ah .

Формат команды установки/сброса отдельного разряда регистра маски:

- биты 1, 0 — номер канала;
- бит 2 — установка/сброс (1/0) маски канала;
- биты 3—7 не используются.

2	1	0
Маска 1/0 — установка/сброс	Канал: 00-0 канал, 01-1, 10-2, 11-3	

Сброс регистра маски выполняется записью произвольного значения в регистр по адресу Eh . При этом разрешается работа всех каналов.

Регистр запросов 4-разрядный (адрес $9h$), ЦП доступен для записи, предназначен для организации программного (а не аппаратного) запроса ПДП. Чтение запросов в каналах может выполняться из РС БУК. Формат команды установки/сброса отдельного разряда регистра запросов такой же, как и для регистра маски.

Общий сброс КПДП выполняется сигналом на входе $RESET$ или записью произвольного значения по адресу Dh . Очищаются регистры блока управления контроллером: РУ, РС, РЗ и РМ. Для дальнейшего использования контроллер должен быть заново инициализирован.

5.7.9. Регистры каналов контроллера ПДП

Каналы контроллера ПДП содержат по одному 8-разрядному регистру режима и по четыре 16-разрядных регистра: регистр адреса базовый, регистр счетчик базовый, регистр адреса текущего, регистр счетчик текущий.

Регистр режима работы канала (адрес Bh для любого канала) определяет: режим обслуживания ВУ, тип цикла ПДП, необходимость автоинициализации, инкремент или декремент адреса. Процессору регистр доступен для записи (рис. 5.41).



Рис. 5.41. Регистр режима работы канала

Назначение отдельных разрядов регистра режима канала:

- биты 1, 0 — номер канала (00 — канал 0, 01 — канал 1, 10 — канал 2, 11 — канал 3);
- биты 3, 2 — тип цикла ПДП (00 — проверка, 01 — запись в ОЗУ, 10 — чтение из ОЗУ, 11 — запрещено);
- бит 4 — автоинициализация канала запрещена/разрешена (0/1). Если разрешена автоинициализация, то после завершения работы канала в регистры адреса и счетчика записываются исходные значения, указанные при инициализации канала;
- бит 5 — определяет инкремент/декремент — 0/1 адреса ОЗУ;
- биты 7, 6 — режим обслуживания (00 — передача по требованию, 01 — одиночная передача, 10 — блочная передача, 11 — каскадирование).

В режиме каскадирования содержимое бит 5—2 регистра режима не используются.

В циклах проверка передачи выполняются псевдопередачи. Контроллер прямого доступа к памяти работает, как будто он выполняет чтение или запись, генерируя адреса и отвечая на соответствующие сигналы управления. Линии управления памятью и устройствами ввода-вывода *MEMR/IOW* или *IOR/MEMW* остаются неактивными, и никакие данные фактически не посылаются или не принимаются. Одно периферийное устройство ввода-вывода, которое выполняло большое количество передач данных с памятью, — это накопитель на гибких магнитных дисках (НГМД). В *IBM*-совместимых компьютерах НГМД управляется чипом поддержки, названным контроллером гибкого диска. Одна из задач контроллера гибкого диска состоит в том, чтобы работать вместе с контроллером прямого доступа в память, чтобы облегчить передачу данных между накопителем на гибких магнитных дисках компьютерной системы и памятью компьютера.

Прежде чем начать передачу данных между контроллером гибкого диска и памятью, используется проверка передачи, чтобы определить тип настоящего НГМД. Проверка позволяет определить скорость передачи данных, которая будет использоваться в наступающей передаче. Чтобы определять скорость передачи данных, системное ПО программирует КППД в режим проверки и выдает команду чтения на контроллер гибкого диска. Когда контроллер гибкого диска получает данные от гибкого диска, которые должны быть переданы в память, он выставляет запрос прямого доступа в память (*DREQ*) контроллеру ПДП, чтобы координировать наступающую передачу. КППД отвечает сигналом разрешения ПДП *DACK*.

Режимы обслуживания ВУ. В режиме *одиночной передачи* (01) контроллер после передачи каждого байта освобождает шину минимум на один цикл, но сразу же начинает проверку сигнала *DREQ* и, как только обнаруживает активный уровень сигнала, инициирует следующую передачу.

В режиме *блочной передачи* (10) сигнал *DREQ* должен сохраняться только до формирования активного сигнала *DACK*, после чего шина не освобождается до передачи всего блока.

Режим *передачи по требованию* (00) аналогичен предыдущему (блочная передача), но после каждой передачи проверяется сигнал *DREQ*. Если сигнал *DREQ* пассивный, передачи ПДП приостанавливаются до тех пор, пока он не станет активным. Режим по требованию позволяет приостановить передачу, если устройство не может продолжить ее.

Режим *каскадирования* (11) обеспечивает включение нескольких контроллеров, когда в системе требуется более четырех каналов. В режиме каскадирования значения бит 5—2 регистра режима не используются.

Регистр *адреса базовый* хранит начальный адрес ОЗУ канала ПДП. До начала обмена по каналу ПДП в него заносится начальный адрес ОЗУ.

Регистр *счетчик базовый* хранит общее число циклов ПДП минус один. В процессе работы канала ПДП содержимое этих регистров не меняется.

Регистр *адреса текущего* содержит текущий адрес ячейки памяти для выполнения очередного цикла обмена данными в режиме ПДП. После выполнения цикла ПДП содержимое этого регистра увеличивается или уменьшается на единицу, как указывает бит 5 регистра режима.

Регистр *счетчик текущий* содержит текущее число слов, оставшихся до конца передачи минус 1. При выполнении операций обмена данными регистр-счетчик работает в режиме вычитания и его значение уменьшается до —1 (*FFFFh*), при этом формируется активный уровень сигнала на линии *EOP*. Запись в регистр адреса

текущего или в регистр счетчик текущий одновременно загружает и соответствующий базовый регистр. Чтение возможно только из регистра текущего адреса или счетчика (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Адреса и назначение 16-разрядных регистров каналов

Адрес	Канал	Назначение регистра
00h 01h	0 0	Регистры адреса: базовый, текущий Регистры счетчики: базовый и текущий
02h 03h	1 1	Регистры адреса: базовый, текущий Регистры счетчики: базовый и текущий
04h 05h	2 2	Регистры адреса: базовый, текущий Регистры счетчики: базовый и текущий
06h 07h	3 3	Регистры адреса: базовый, текущий Регистры счетчики: базовый и текущий

Поскольку контроллер может одновременно принимать по одному байту, запись или чтение каждого из 16-разрядных регистров производится двумя операциями вывода или ввода. Для записи в регистры и чтения из них в контроллере предусмотрен триггер первый/последний. Если триггер первый/последний находится в состоянии «0», то выводимый в эти регистры байт загружается в младший байт соответствующего регистра, а триггер первый/последний устанавливается в «1». Единичное состояние триггера первый/последний направляет байт данных в старший байт регистра, а триггер первый/последний сбрасывается в «0». Аналогично выполняется чтение из регистров адреса и счетчика. Если триггер первый/последний находится в нуле, то читается младший байт, а триггер первый/последний устанавливается в «1». Для инициализации триггера до начала операций ввода-вывода предназначен приказ сброса триггера первый/последний, который выполняется операцией запись произвольного значения по адресу *Ch*.

5.7.10. Регистр временного хранения данных при передаче память/память

Адрес регистра *Dh*, процессору регистр доступен для чтения. Используется для хранения байта данных при передаче «память — память». Режим передачи «память — память» позволяет осуществлять перемещение потоков информации в поле ОЗУ. Для реализации этого режима используются каналы 0 и 1 КПДП1. Передача инициируется программно установкой *DREQ0* = 1 в канале 0. После прихода сигнала разрешение шины — *HLDA* = 1 от ЦП, КПДП считывает данные из ячейки памяти с адресом из регистра канала 0 и записывает их в регистр временного хранения. В следующем цикле на магистрали данные из регистра временного хранения записывают-

ся в ячейку памяти с адресом из регистра адреса канала 1. Канал 0 может быть запрограммирован на передачу информации без изменения адреса. Это позволяет заполнить ячейки ОЗУ константой (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Суммарные сведения по операциям с 8-битными регистрами КППД

Адрес	Операция	Назначение операции (обычно BIOS)
08h	Запись	Загрузка регистра управления КППД
08h	Чтение	Чтение регистра состояния КППД
09h	Запись	Программная установка/сброс запросов (индивидуально)
Ah	Запись	Программная установка/сброс масок (индивидуально)
Bh	Запись	Запись в регистр режима работы канала
Ch	Запись	Сброс триггера первый/последний
Dh	Запись	Общий сброс КППД (как по сигналу RESET)
Dh	Чтение	Чтение из регистра временного хранения
Eh	Запись	Общий сброс регистра масок (все $M_i = 0$)
Fh	Запись	Установка/сброс масок всех (каждого) каналов

5.7.11. Каскадирование контроллеров ПДП

Каскадирование контроллеров ПДП выполняется с целью увеличения числа каналов ПДП (рис. 5.42). Один КППД подключается как основной и некоторое количество КППД могут работать как дополнительные контроллеры. При каскадировании КППД, выходы запрос шины (HRQ) и разрешение шины (HLDA) дополнительной схемы подключаются к выводам запрос ПДП (DREQ) и разрешение ПДП (DACK) основной схемы. Сигналы запрос шины — HRQ, разрешения шины — HLDA дополнительного контроллера ПДП проходят через схемы приоритетов дополнительного контроллера ПДП.

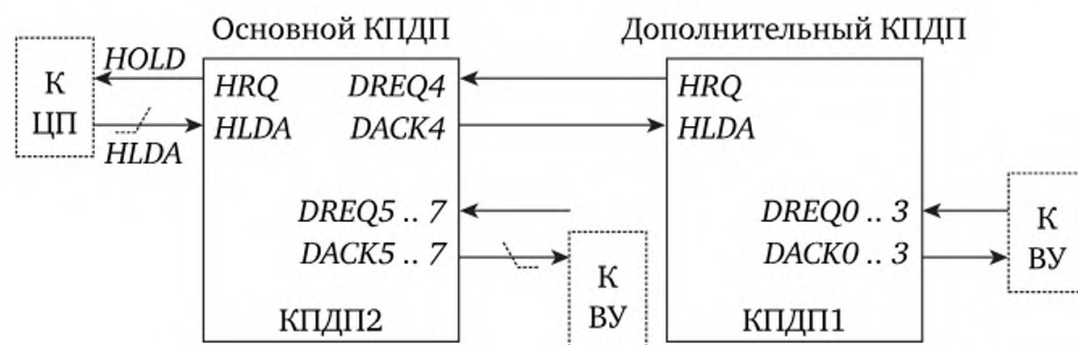


Рис. 5.42. Схема каскадирования контроллеров ПДП

Никакие другие сигналы основного КППД в формировании циклов ПДП дополнительного контроллера не участвуют. Другие КППД могут быть подключены к входам основной или дополнительной схемы КППД. Приоритеты каналов ПДП: 0, 1, 2, 3, 5, 6, 7.

Особенности работы второго контроллера ПДП. Каналы 5—7 обеспечивают 16-битовую передачу данных. В регистры адреса каналов загружаются биты адреса $A1—A16$, в регистры страниц биты $A17—A23$, на линии $A0 = 0$. Максимальный размер страницы составляет 128 килобайт, или 64 К слов. КППД11: $A0—A3$, $A4—A7$, $A8—A15$ (регистр-защелка), $A16—A23$ (регистр страниц). КППД2: $A0 = 0$, $A1—A4$, $A5—A8$, $A9—A16$ (регистр защелка), $A17—A23$ (регистр страниц). Для вычисления адресов регистров 2-го КППД необходимо к базовому адресу второго контроллера ПДП ($\$C0$) прибавить адреса регистров для 1-го КППД умноженные на 2 (сдвинутые на один разряд влево).

Абсолютные адреса регистров 2-го КППД:

$$\text{Адр. КППД2} = C0h + \text{Адр. (КППД1*2)}.$$

Возможности регистров 2-го КППД такие же, как и для 1-го контроллера.

5.7.12. Методика программирования контроллера ПДП

Программирование контроллера ПДП выполняется ЦП в программном режиме работы КППД и включает:

- начальную инициализацию КППД;
- программирование работы каналов.

Начальная инициализация КППД. Начальная инициализация КППД должна выполняться сразу после включения питания по всем каналам, даже если они не используются.

В ЭВМ семейства *IBM* инициализация КППД выполняется *BIOS*, которая устанавливает:

- активные уровни сигналов на входе *DREQ* (высокий), на выходе *DACK* (низкий);
- цикл записи — нормальный;
- приоритеты — фиксированные;
- временной цикл ПДП — нормальный;
- работа контроллера ПДП — разрешена;
- режим управления ПДП — ВУ-память;
- все каналы — маскированы.

Программирование канала контроллера ПДП:

1) запрет работы канала на время его программирования. Операция индивидуального маскирования/разрешения канала в регистре масок по адресу Ah ;

2) установка режима работы канала. Операция записи в регистр режима по адресу Bh ;

3) сброс триггера «первый/последний». Операция записи произвольного значения по адресу *Ch*;

4) запись младших 16 бит адреса памяти, используемой для передачи данных по каналу ПДП, в регистры адреса базового и текущего последовательно по 8 бит;

5) запись старших бит адреса в регистр страниц канала;

6) запись в регистры счетчики базовый и текущий числа, на единицу меньшего, чем количество передаваемых байт (последовательно по 8 бит — младший, затем старший);

7) разрешение работы канала.

Операция индивидуального маскирования/разрешения канала в регистре масок по адресу *Ah*. Сразу после разрешения работы канал может начать передачу данных, если внешнее устройство устанавливает сигнал *DREQ*.

5.7.13. Реализация методики программирования контроллера ПДП

Программируется первый канал, запись в ОЗУ (чтение из ОЗУ), 1000 байт, одиночными словами в среде *Borland Pascal*:

```
var Buf: array [1..500] of INTEGER; {Резервируется память}.
{Данные КПДП передает по байтам и затем складывает в 16-разрядные слова.}
addr_buf: longint; {Вспомогательные переменные для}
Apage, Aofs: word; {вычисления адреса буфера и расщепления его на страницу и смещение.}
begin
1) Port[$A] := 5; {M1=1 – запрет работы 1 канала в регистре масок.}
2) Port [$B] := $45; {Запись в регистр режима канала 1.}
{Режим: запись в ОЗУ, адрес инкрементируется, без авто инициализации, одиночными словами ($45) 05h – по требованию, 85h – блочный обмен}
{Режим: 49h – чтение из ОЗУ одиночными словами, 09h – по требованию, 89h – блочный обмен.}
addr_buf := Seg(Buf);
addr_buf := (addr_buf shl 4) + Ofs(Buf);
{Вычисление физического адреса буфера данных.}
{Функция Seg(X):word возвращает сегментную часть адреса аргумента X, где X – переменная, процедура или функция.}
{Функция Ofs(X):word возвращает смещение адреса аргумента X, где X – идентификатор переменной, процедуры или функции.}
Apage := addr_buf shr 16; {Старшие биты адреса.}
Aofs := addr_buf and $FFFF; {Младшие биты адреса.}
{Расщепляем адрес на страницу и смещение.}
3) Port [$C] := 0; {Сброс триггера первый/последний.}
4) Port [$2] := Lo (Aofs);
4) Port [$2] := Hi (Aofs);
{Запись младших 16-битов в регистры базового и текущего адреса канала 1.}
```

```

5) Port [$83]:=Apage;
   {Запись старших бит адреса в регистр страниц 1 канала.}
6) Port [$3]:= Lo (sizeof(Buf) - 1);
   Port [$3]:= Hi (sizeof(Buf) - 1);
   {Функция SizeOf (X): word; возвращает длину внутреннего пред-
   ставления аргумента в байтах.} {Запись в текущий и базовый
   регистры счетчики канала 1 количества передаваемых байтов.}
7) Port [$A]:= 1; {Разрешение работы канала.}
end.

```

Если интерфейс ВУ установит сигнал $QREQ = 1$, то КПДП начнет выполнять циклы ПДП своими аппаратными средствами, как запрограммировано.

Тема 6

ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЛЕРЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

6.1. Понятие программируемого логического контроллера и области их применения

Программируемый логический контроллер (ПЛК), международное название PLC — *programmable logic controller*, представляет собой микропроцессорное устройство, предназначенное для сбора, преобразования, обработки и хранения информации с объекта управления, а также выработки команд управления. На данный момент ПЛК широко используются как в локальных системах автоматизации, при управлении какими-либо станками, конвейерами и т. п., так и в распределенных системах управления, для сбора и обработки информации.

На начальном этапе развития микропроцессорных контроллеров было четкое разделение на PLC и RTU — *remote terminal unit* («удаленное оконечное устройство»), в распределенных системах под этим термином подразумевается устройство телемеханики контролируемого пункта. У этих устройств было разное назначение. *Programmable logic controller* предназначался для локального управления и имел широкие вычислительные возможности для выработки команд управления. RTU использовались в распределенных системах как устройства сбора информации с датчиков и преобразования ее в пакеты цифровых каналов связи, а также для обратного преобразования управляющих команд из центра, они обладали широкими возможностями по построению систем связи.

С развитием микропроцессорной техники разница между RTU и PLC почти стерлась. В PLC добавили различные каналы связи, в связи с тем, что даже при локальном управлении иногда требуется передача данных, например, при сборе общей статистики по цеху, при мониторинге общего состояния оборудования и т. п. В RTU добавили расширенные возможности по обработке данных, для проведения предварительной обработки получаемой информации и даже выработки управляющих воздействий в ответ на события, требующие

немедленной реакции, например: анализ изменения информации с датчиков, если информация не изменяется, увеличиваются интервалы ее передачи, что сразу снижает требования к каналу связи, или реакция на нештатные, аварийные ситуации, когда управляющие воздействие необходимо выработать в течение долей секунды и т. п.

Тем не менее на данный момент при построении локальных систем чаще всего употребляют термин PLC, а при построении распределенных систем — RTU. Многие производители микропроцессорных контроллеров также позиционируют свои устройства как RTU или PLC. Это совсем не означает, что они не могут быть применены в другой области. Для избежания путаницы в терминах в дальнейшем микропроцессорные контроллеры будем обозначать термином «ПЛК».

Отдельно необходимо отметить появление таких устройств, как удаленные модули ввода/вывода. По сути это устройства, выполняющие функции ранних RTU, они собирают данные со своих входов и передают их по запросу по цифровому каналу связи с помощью какого-либо стандартного протокола связи. Также они могут (но не обязательно!) осуществлять простейшую логику в виде нескольких последовательных И/ИЛИ с дискретными входами, с последующим выводом результата на дискретные выходы. Например, удаленные модули ввода/вывода компании Advantech используют для передачи данных каналы Ethernet или RS-485/422, в качестве протоколов используется MODBUS TCP или MODBUS RTU.

6.2. Состав программируемого логического контроллера

В общем случае ПЛК представляет собой базу, на которую устанавливаются модули в соответствии с решаемой задачей (рис. 6.1). Блок питания (БП) может быть как встроенным в базу, так и устанавливаться отдельно. Как правило, контроллеры питаются от бытовой электросети ~220 В. Блок питания может быть снабжен резервным аккумулятором для поддержания работы контроллера в случае пропадания внешнего электропитания. Далее на базу устанавливается модуль центрального процессорного устройства (ЦПУ) и модули для подключения к датчикам и исполнительным устройствам (модули ввода/вывода). На базу могут также устанавливаться специализированные модули связи, например Ethernet или дополнительные последовательные порты связи.

Как правило, в ПЛК устанавливается один модуль ЦПУ, остальные слоты базы занимают модули ввода/вывода. Некоторые ПЛК допускают установку нескольких модулей ЦПУ, например, для организации горячего резервирования модуля ЦПУ некоторые ПЛК допускают установку двух модулей ЦПУ. Модуль ЦПУ может обслу-

живать ограниченное число модулей ввода/вывода. Некоторые ПЛК позволяют повысить этот лимит с помощью установки дополнительных модулей ЦПУ. Такие модули становятся ведомыми, вся обработка все равно ведется в основном модуле ЦПУ, остальные ЦПУ занимаются обслуживанием модулей ввода/вывода. Например, рассмотренные ниже контроллеры MOSCAD имеют лимит 15 модулей на 1 ЦПУ, при этом позволяют подключить дополнительно до 15 ведомых таких же модулей ЦПУ, с 15 модулями ввода/вывода для каждого из них.

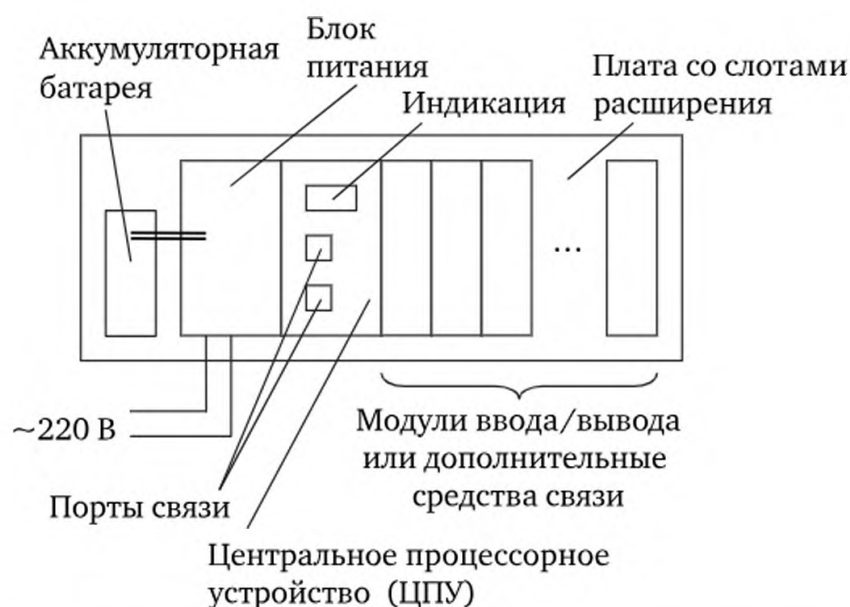


Рис. 6.1. Типовая структура программируемого логического контроллера

В простейших случаях ПЛК может быть представлен единым устройством, в котором БП, ЦПУ и модуль ввода/вывода объединены в одном корпусе (рис. 6.2).

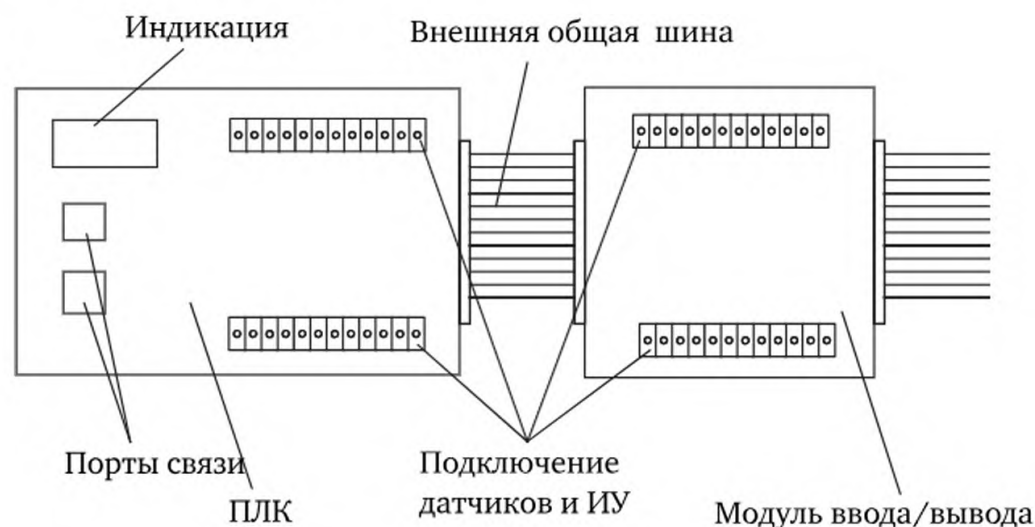


Рис. 6.2. ПЛК в виде единого устройства с внешними модулями ввода/вывода

Дополнительные модули ввода/вывода при этом подключаются специальными шлейфами и также имеют собственный корпус. В самом простом случае подключение дополнительных модулей к ПЛК не предусматривается.

6.2.1. Модуль центрального процессора и его составляющие

Устройство модуля ЦПУ очень схоже с устройством ПК. По сути это и есть специализированная ЭВМ, со своей операционной системой (ОС), ориентированная на сбор и обработку данных в режиме реального времени (РВ).

Модуль ЦПУ состоит из материнской платы, на которой расположены микропроцессор, оперативная память (ОЗУ), постоянная память (ПЗУ), часы реального времени и порты связи с другими контроллерами и периферийными устройствами. Также на материнской плате расположен контроллер шины данных, с помощью которой осуществляется подключение дополнительных модулей ПЛК. В некоторых модулях ЦПУ есть резервная батарея для поддержания работы часов и состояния памяти в случае отсутствия питания ЦПУ. В зависимости от сложности ПЛК на материнской плате могут присутствовать слоты для установки дополнительных портов связи, сопроцессора, расширения ОЗУ и т. п.

Рассмотрим перечисленные составляющие ЦПУ более подробно.

Микропроцессор. В ПЛК используется широкий спектр микропроцессоров различных архитектур — ARM, MIPS, PowerPC и даже x86 (семейство микропроцессоров ПК). Производительность используемых в ПЛК микропроцессоров обычно невысока, даже у довольно мощных и современных она находится на уровне микропроцессоров *Intel* серии 486. В данном случае приоритет отдается не скорости вычисления, а низкому энергопотреблению и надежности всей платформы в целом. В силу того, что ПЛК — это специализированная ЭВМ, имеющая очень узкий и ограниченный объем задач, больших вычислительных мощностей здесь не требуется.

Часто конечный пользователь — человек, пишущий программу для ПЛК, даже не знает, какой архитектуры микропроцессор у контроллера и какая операционная система управляет внутренним процессом в ПЛК. Для него это не столь важно, поскольку производитель ПЛК предоставляет утилиты для работы с ним, в которых на специализированных языках и производится программирование. Для программиста более важно знать, сколько таймеров/счетчиков он может организовать, какие ячейки ОЗУ ему доступны для хранения данных и т. п.

Оперативное запоминающее устройство. Как и ОЗУ любой ЭВМ служит для хранения данных, над которыми производятся вычисления, обеспечения работы ОС ПЛК и хранения прочей оперативной информации. Наиболее часто в ПЛК в качестве оперативной

памяти используется так называемая статическая память — SRAM (*Static Random Access Memory*). Это память, ячейки которой основаны на триггерах. Триггеры соединяются таким образом, что вся связка имеет два устойчивых состояния, в которые ячейка переключается по управляющему сигналу. Таким образом, в ячейке памяти хранятся значения одного бита информации. Эта оперативная память обладает высоким быстродействием и низким энергопотреблением. Кроме того, состояние ячеек такой памяти можно поддерживать подачей на нее питающего напряжения, при очень низком токе потребления, что позволяет сохранять ее состояние с помощью резервной батареи. Основным минус такой памяти — довольно высокая стоимость.

Что касается объемов, то в современных контроллерах они могут достигать всего лишь нескольких десятков мегабайт. Это, опять же, обусловлено узким кругом задач ПЛК, большие объемы здесь не требуются. Простейшие ПЛК имеют объемы ОЗУ всего в несколько килобайт. Учитывая вышесказанное, стоимость ОЗУ не играет особой роли.

Объем имеющейся оперативной памяти обычно делится между операционной системой ПЛК и программой пользователя, поэтому не вся память доступна программисту. Кроме того, часть доступной программисту памяти может занимать служебная информация, например, текущие значения таймеров и счетчиков, параметры протоколов связи, переменные для работы с функциями ОС контроллера и т. п. Таким образом, объем памяти, доступной для хранения данных, может отличаться в разы от имеющегося объема ОЗУ ПЛК.

В качестве альтернативы статической памяти может использоваться динамическая память — DRAM (*Dynamic Random Access Memory*). Ячейки этой памяти основаны на связке конденсатора и транзистора, значение информационного бита хранится с помощью заряда на конденсаторе. Поскольку заряд с конденсатора довольно быстро утекает, требуется постоянное обновление содержимого ячеек такой памяти. Эта процедура называется «регенерацией» ячеек памяти. Отсюда и получаются основные минусы такой памяти — высокое энергопотребление, сниженное быстродействие и необходимость организации специальных контроллеров памяти, обеспечивающий доступ к ней и процедуру «регенерации» ячеек.

В качестве достоинства такой памяти, можно привести низкую стоимость, но, как уже было сказано выше, в ПЛК это особой роли не играет. В основном ОЗУ такого типа используется в ПК.

Постоянная память. Служит для хранения ОС ПЛК, настроек ПЛК и программы пользователя. В современных контроллерах в качестве ПЗУ используется флеш-память. До появления флеш-памяти в ПЛК использовались различные виды электрически стираемой и перезаписываемой постоянной памяти (EEPROM — *Electrically*

Erasable Programmable Read — Only Memory). Из-за малых объемов микросхем такой памяти на данный момент ее полностью вытеснила флеш-память. Основные недостатки флеш-памяти — меньшее количество циклов стирания/записи и меньший срок хранения не сильно сказываются, поскольку, как правило, в ПЛК используются недешевые виды флеш-памяти, которые по этим двум характеристикам превосходят флеш-память бытовых устройств.

Если говорить о приблизительных цифрах, то у бытовой многоуровневой флеш-памяти в среднем возможно до 10 000 циклов стирания/перезаписи, гарантированный срок хранения информации — до 10 лет в начале службы ячейки и 1 год при сильном износе ячейки. Для более дорогой одноуровневой флеш-памяти допускается до 100 000 циклов стирания/перезаписи, сроки хранения информации в таких ячейках также больше. Для сравнения ячейки EEPROM допускают до 1 млн циклов перезаписи, и срок хранения данных в них может достигать 100 лет.

Часы реального времени. Основное назначение этих часов — организация измерения интервалов времени, т. е. на их основе организуются таймеры внутри ПЛК. Также они используются как внутренние часы текущего времени ПЛК, но не стоит забывать, что, как и все электронные часы, они не точны. Расхождения в текущем времени на разных ПЛК могут достигать нескольких секунд в день. Поэтому организовывать посылки данных с меткой времени на основе часов ПЛК следует с большой осторожностью.

Некоторые задачи все же требуют метки точного времени в пакетах данных, отсылаемых контроллерами. Если производитель контроллеров не предоставляет инструментов для синхронизации времени в сети ПЛК, то лучше использовать GPS-приемники для получения точного времени. Реализация некоторых задач возможна только с помощью GPS-приемников, например, задача обнаружения места утечки в транспортирующем что-либо трубопроводе требует наличия графиков изменения давления в трубе с обеих сторон от места утечки. Место утечки вычисляется на основе разности времен изменения давления.

Порты связи. Их также называют *коммуникационные порты*. Они предназначены для организации связи между контроллерами, а также связи контроллеров с верхним уровнем системы АСУТП. Кроме того, с помощью этих портов осуществляется загрузка настроек и программы пользователя в ПЛК. В зависимости от сложности и назначения ПЛК модуль ЦПУ может быть оборудован как одним, так и несколькими коммуникационными портами. Например, в модуле ЦПУ ПЛК фирмы *Motorola* серии ACE3600 может быть установлено до пяти коммуникационных портов.

В большинстве контроллеров устанавливаются последовательные коммуникационные порты, стандартов RS-232 или

RS-422/485 (о них речь пойдет далее). Для загрузки настроек и программы в ПЛК используется RS-232, который также есть в большинстве стационарных персональных компьютерах, там он называется COM-порт. В связи с тем, что в современных ноутбуках COM-порт очень часто не предусмотрен, используют переходники из USB в RS232 (USB-to-RS232).

В современных ПЛК могут быть порты Ethernet и USB. В зависимости от сложности ПЛК Ethernet может использоваться как для передачи данных, так и для загрузки настроек и программы в ПЛК. Порт USB в силу своей специфики используется только для загрузки настроек и программы в ПЛК, для передачи данных он не применяется. Также в модуле ЦПУ могут быть предусмотрены слоты для коммуникационных плат расширения, реализующих, например, соединение с радиомодемом или специализированным модулем Ethernet и т. п. Обычно эти слоты предусматривают и установку дополнительных последовательных портов.

Резервная батарея. Как уже было сказано ранее, используется для поддержания работы часов реального времени в случае отсутствия питающего напряжения модуля ЦПУ. Если в качестве ОЗУ выступает статическая память, может быть реализована поддержка ее текущего состояния с помощью этой батареи. Важно понимать, что с помощью этой батареи будет именно поддерживаться состояние ОЗУ на момент отключения питающего напряжения, модуль ЦПУ при этом работать не будет.

Обычно в качестве резервной батареи используется небольшая литиевая батарея, как в часах или ПК. С помощью этой батареи состояние ОЗУ может поддерживаться в течение довольно длительного времени — месяц и даже более. Кроме перечисленных компонентов на модуле ЦПУ присутствуют светодиоды для индикации текущего состояния. Количество и назначение этих светодиодов зависит от модели и производителя контроллеров.

На модуле ЦПУ могут присутствовать элементы управления — кнопки и подстроечные резисторы. Текущее состояние этих элементов, как правило, доступно программисту, и на этой основе может быть реализовано переключение между режимами работы программы ПЛК или изменение значений каких-либо величин в программе ПЛК.

6.2.2. Модули ввода/вывода

Как уже говорилось ранее, модули ввода/вывода предназначены для непосредственного соединения с датчиками, исполнительными устройствами, УПУ и УМ. Они выполняют связующую роль между ЦПУ ПЛК и объектом управления. В этих модулях как раз и реализованы измерительные схемы, схемы АЦП/ЦАП преобразования, схемы усиления, схемы защиты от нештатных токов и напряжений.

В одном модуле, как правило, реализовано несколько каналов для измерения сигналов с датчиков или для работы с исполнительными устройствами. Один канал называют точкой, т. е. каналы, измеряющие сигнал с датчиков, называют *входными точками*, а каналы, выдающие выходные воздействия на исполнительные устройства, называют *выходными точками*. Кроме того, каналы модулей ввода/вывода по типу сигнала, с которым они работают, делятся на *аналоговые* и *дискретные*.

Таким образом, каналы модулей ввода/вывода делятся на четыре типа — входные дискретные точки, выходные дискретные точки, входные аналоговые точки и выходные аналоговые точки.

Устройство входных дискретных точек. Обозначаются они DI, от английского *discrete input*. С точки зрения ПЛК такие входы имеют два состояния — «включен» и «выключен», т. е. кодируются одним битом, который принимает значение «1» или «0». Они делятся на два типа — «сухой» контакт, от англ. *dry contact* (рис. 6.3, а), и «мокрый», или «смоченный» контакт, от англ. *wet contact* (рис. 6.3, б).

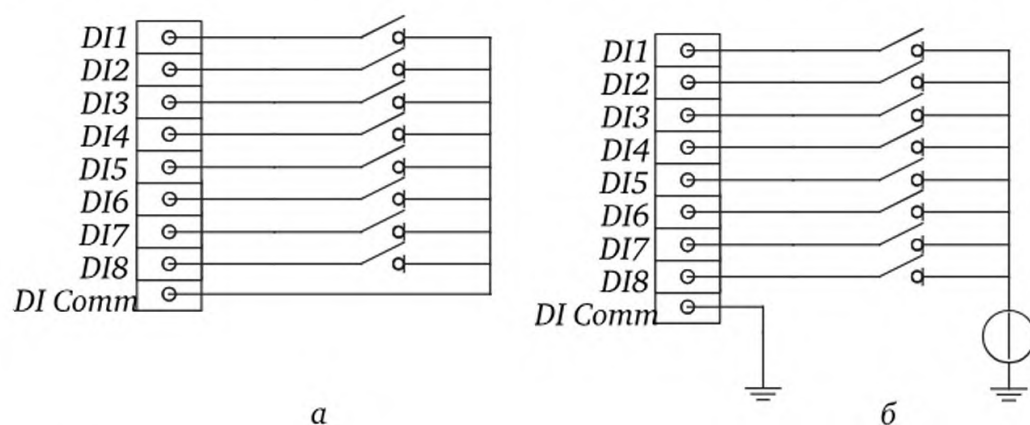


Рис. 6.3. Схемы подключения дискретных входных точек типа «сухой» контакт (а) и «смоченный» контакт (б)

В обоих случаях дискретные входы реагируют на подачу на них некоторого напряжения. При подаче напряжение выше верхнего порога переключения модуля вход принимает состояние «включен». При снижении напряжения на входе модуля за нижний порог вход принимает состояние «выключен». Разница между типами входов — в расположении источника напряжения для них. В случае «сухого» контакта источник напряжения находится внутри модуля, кроме того он должен быть гальванически развязан с землей и питающим напряжением модуля. В случае «смоченного» контакта требуется внешний источник напряжения.

Некоторые производители организует внутри своих модулей типа «смоченный» контакт отдельный источник напряжения, со своими выходами. Например, модули дискретных входов ПЛК MOSCAD-L снаб-

жены источником питания на 24 В. Таким образом, можно пользоваться этим модулем как модулем типа «сухой» контакт.

В любом случае необходимо учитывать, что мощность источников напряжения встроенных в модули невысока. Поэтому при большой протяженности линии подключения датчика и (или) при высоком уровне наводок из окружающего пространства следует использовать внешние источники напряжения и модули типа «смоченный» контакт.

Разные модели модулей типа «мокрый» контакт могут иметь различные диапазоны входных напряжений и работать как с переменным, так и с постоянным напряжением.

Устройство выходных дискретных точек. Обозначаются они DO, от англ. *discrete output*. Они имеют два состояния — «включено» и «выключено». Как правило, реализованы в виде электронных ключей внутри модуля, замыкающих точку выхода с общей точкой (рис. 6.4). Ключи могут быть выполнены с помощью реле или транзисторов. Реле позволяют управлять устройствами более высокой мощности, но следует учитывать, что они постепенно изнашиваются в момент переключения. Иными словами, с помощью модулей на основе реле нельзя организовывать импульсное управление. Выходы на основе транзисторов наоборот, имеют меньшую допустимую мощность, но не ограничены в количестве переключений и обладают более высоким быстродействием в сравнении с реле. Как правило, к общей точке выходов подводится питающее напряжение исполнительных устройств.

Ключи на основе реле
или транзисторов
внутри модуля

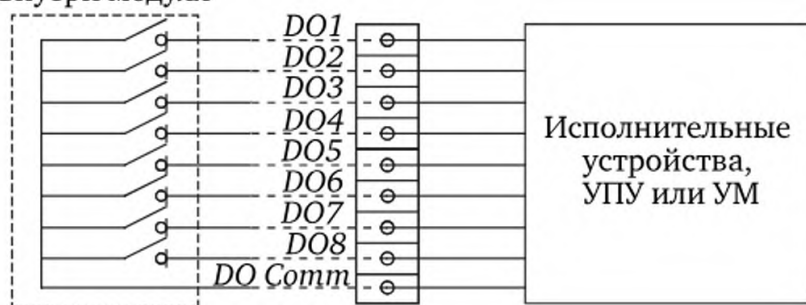


Рис. 6.4. Схема подключения дискретных выходных точек

Устройство входных аналоговых точек. Обозначаются они AI, от англ. *analog input*. Преобразуют входное значение тока или напряжения помощью АЦП в цифровой вид. Могут быть как биполярными, так и униполярными. Измерение аналогового сигнала может быть также реализовано двумя способами — с общей точкой для всех каналов (несимметричное подключение (рис. 6.5, а)) или

по разности между двумя точками (дифференциальное подключение (рис. 6.5, б)).

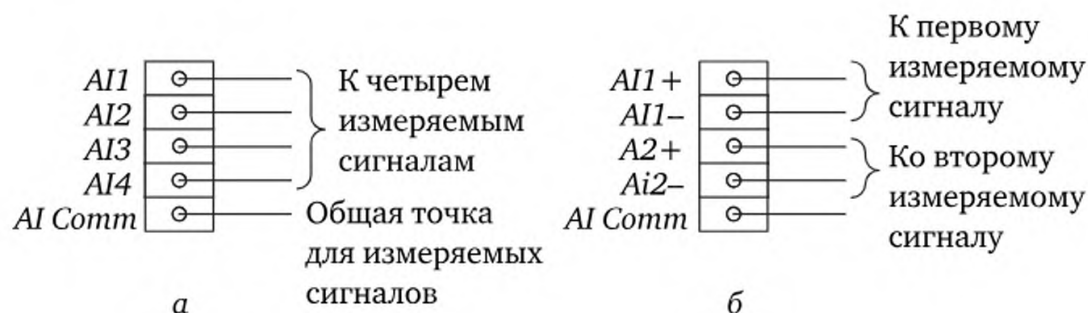


Рис. 6.5. Схема подключения аналоговых входных точек

Схема измерения, а также полярность измерения, как правило, жестко заданы в конкретной модели модуля ввода/вывода. Разрядность АЦП связана с конкретной моделью, наиболее часто используются 12-, 14- и 16-битные униполярные преобразования, а также 13- и 16-битные биполярные преобразования.

Диапазон измеряемых значений токов или напряжений, а также тип сигнала, постоянный или переменный ток, фиксирован для конкретной модели. Наиболее часто используется диапазон измерений ± 20 мА по току и ± 5 В по напряжению. Стандартный диапазон работы датчиков 4—20 мА по току, и многие производители гарантируют точность измерений именно в этом диапазоне, хотя их модули, например, могут работать с диапазоном 0—20 мА.

Устройство выходных аналоговых точек. Обозначаются они АО, от англ. *analog output*. Производят ЦАП-преобразование и предварительное усиление цифрового значения сигнала. Схемы подключения аналогичны аналоговым входам, но наиболее часто используются униполярный сигнал и несимметричное подключение. Некоторые модули также требуют подключения внешнего источника питания, в этом случае он подключается к общей точке.

6.2.3. Сенсорные панели

Сенсорные панели предназначены для реализации средств отображения текущего состояния и предоставления возможности управления происходящим процессом локально на объекте управления. По сути это небольшой жидкокристаллический дисплей с сенсорным экраном. Дисплей может быть как цветным, так и монохромным. Сенсорные панели выполняются в пыле- и по возможности влагозащищенном корпусе.

Можно выделить два вида сенсорных панелей — сенсорные панели, разработанные специально для определенной линейки моделей ПЛК, и сенсорные панели, которые могут работать с любым ПЛК и даже без ПЛК вовсе. В первом случае сенсорная панель напрямую

связывается с ПЛК, обычно с помощью RS232. В этом случае панель напрямую взаимодействует с ячейками памяти ПЛК, отображая какую-либо информацию из них на дисплее и передавая информацию о нажатиях областей управления в память ПЛК. Вся обработка информации в этом случае идет со стороны ПЛК. Во втором случае сенсорная панель фактически реализует функции ЦПУ ПЛК, т. е. принимает информацию по какому-либо интерфейсу (RS232, RS485, Ethernet) от датчиков или других ПЛК и далее может ее обрабатывать, выводить на дисплей, принимать нажатия областей управления и отсылать их по тому же интерфейсу ПЛК.

Что касается ПО, то для сенсорных панелей их производители предоставляют утилиты создания «экранов» которые будет отображать сенсорная панель. Причем возможно переключение между этими экранами с помощью элементов управления, отображаемых сенсорной панелью. Для первого вида сенсорных панелей предоставляется утилита связи отображаемых элементов и ячеек памяти ПЛК. В случае второго вида сенсорных панелей также предоставляются утилиты для создания управляющей программы сенсорной панели и настройки протоколов для обмена с другими устройствами.

В заключение необходимо отметить, что сенсорные панели менее удобны, чем реализованные отдельно органы управления в виде кнопок, тумблеров, цифровых дисплеев и т. д. Однако сенсорные панели — более гибкий инструмент, позволяющей при изменении алгоритмов управления соответствующим образом изменить органы управления. Кроме того, в большинстве случаев покупка сенсорной панели обходится дешевле разработки специального пульта управления.

6.3. Интерфейсы связи, используемые в программируемых логических контроллерах

Для связи между контроллерами, а также для связи контроллеров с различным оборудованием и верхним уровнем распределенной системы используются различные интерфейсы связи. Их можно разделить на три группы — интерфейсы последовательной передачи данных, Ethernet и различные виды модемов. Интерфейс USB тоже использует последовательную передачу данных, но, как было сказано ранее, имеет свои особенности и будет рассматриваться отдельно.

6.3.1. Интерфейсы последовательной передачи данных RS232 и RS485

RS232. Рассчитан на соединение двух абонентов между собой, такой тип соединения называется «точка — точка», от англ. *point-to-point*. Это стандарт связи, рассчитанный на девятипроводную

линию, широко использовался для подключения модемов к персональным ЭВМ. В ПЛК часто используются не все его сигнальные провода, а только часть. Соединение между двумя абонентами показано на рис. 6.6.

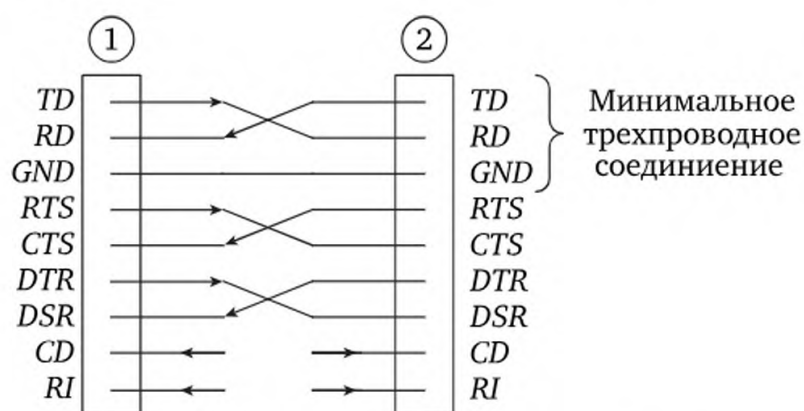


Рис. 6.6. Соединение двух абонентов по RS232C

Обозначения, используемые на рис. 6.6:

- TD (*Transmit Data*) — выход передатчика;
- RD (*Receive Data*) — вход приемника;
- GND — общая точка;
- RTS (*Request To Send*) — выход запроса передачи данных, состояние «включено» уведомляет другого абонента о наличии у терминала данных для передачи;
- CTS (*Clear To Send*) — вход разрешения терминалу передавать данные, состояние «выключено» запрещает передачу данных;
- DTR (*Data Terminal Ready*) — выход сигнала готовности терминала к обмену данными, состояние «включено» поддерживает коммутируемый канал в состоянии соединения;
- DSR (*Data Set Ready*) — вход сигнала готовности от аппаратуры передачи данных (модем в рабочем режиме подключен к каналу и закончил действия по согласованию с аппаратурой на противоположном конце канала);
- CD (*Carrier Detected*) — вход сигнала обнаружения несущей удаленного модема;
- RI (*Ring Indicator*) — вход индикатора вызова (звонка), в коммутируемом канале этим сигналом модем сигнализирует о принятии сигнала вызова.

Направления сигналов обозначены стрелками.

Часто для соединения между двумя ПЛК, а также для соединения ПЛК с персональным компьютером используется минимальное трехпроводное соединение. Добавление еще двух сигналов RTS и CTS позволяет приостанавливать передачу, когда одна из сторон не готова принимать данные. Следующие три сигнала DTR, DSR и CD используются при связи ПЛК с модемом. Последний сигнал

RI применяется в модемах для коммутируемых каналов, часто в ПЛК его подсоединение не предусмотрено.

В различных ПЛК этот интерфейс реализуется с разным количеством контактов и разными разъемами. В простых ПЛК предусмотрено только минимальное соединение по трем проводам. Данный интерфейс имеет несколько редакций, наиболее распространена версия RS-232C, о которой и будет идти речь далее.

Интерфейс RS232 не помехоустойчив, поскольку передача информационного сигнала в какую-либо из сторон ведется по одному проводу относительно общей точки. Как следствие расстояния и скорости передачи небольшие. Согласно стандарту RS232C максимальная скорость данной линии связи 115 200 бод при длине кабеля не более 1,5 м, максимальная длина кабеля — 15 м, при скорости передачи не более 9600 бод. Бод — это единица измерения скорости цифрового канала связи, показывающая максимально физически возможную частоту передачи. При этом не учитывается, что часть канала занимает служебная информация, а это снижает скорость передачи данных несущих информацию. Иногда вместо бод применяют термин бит/с, но это не совсем корректно. Следует также учитывать, что при сильных наводках из окружающего пространства, возможно, не удастся добиться соединения на максимальной скорости или на максимальное расстояние.

Данный интерфейс позволяет вести передачу в двух направлениях одновременно, т. е. является полнодуплексным.

Что касается уровней сигналов, то в RS232C сигналы передаются напряжением 12 В разной полярности, логическая единица — это -12 В, а логический ноль — $+12$ В. Приемник различает сигналы в диапазоне 3—25 В, советующей полярности. В случае отсутствия передачи в канал связи подается логическая единица, т. е. -12 В.

RS485. Рассчитан на соединение до 32 абонентов между собой, все абоненты имеют равный приоритет и могут как передавать, так и принимать данные. Такой тип соединения называется многоточечной линией связи, от англ. *multidrop*. Информационные сигналы передаются в виде разности потенциалов двух проводов витой пары (рис. 6.7). Всего в передаче данных участвует только одна пара, поэтому передача возможна только в одном направлении, т. е. канал полудуплексный.



Рис. 6.7. Передача сигналов по линии связи RS485

Приемник принимает разность потенциалов двух проводов, а не напряжение на отдельном проводе, чувствительность прием-

ника ± 200 мВ. При соединении нескольких абонентов соответствующий провод подключается к соответствующему входу приемника (рис. 6.8).

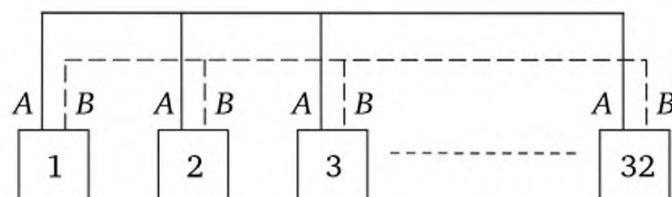


Рис. 6.8. Организация соединения 32 абонентов по RS485

В одном сегменте сети RT485 допускается максимально 32 абонента, максимальная протяженность одного сегмента — 1200 м. При использовании специальных повторителей RS485 можно добавлять новые сегменты сети, расширяя, таким образом, количество абонентов. Максимально возможное количество абонентов — 256 с учетом повторителей. Следует учитывать, что активную передачу сможет вести только один из абонентов, остальные будут ждать, пока канал освободится. Поэтому для увеличения количества абонентов нужен анализ объемов передаваемой информации, а также требуемой частоты передачи. Кроме того, увеличение количества абонентов ведет к увеличению вероятности коллизии — ситуации, когда два и более абонента начинают передачу данных одновременно. Механизм разрешения и снижения вероятности коллизий обычно закладывается на уровне протокола передачи.

Согласно стандарту RS485 максимальная скорость передачи составляет 10 Мбит/с при длине кабеля не более 10 м. При максимальной длине 1200 м скорость передачи — не более 62,5 кбит/с. Здесь также имеется в виду физическая пропускная способность канала и не учитывается, что часть канала займет служебная информация.

При большой протяженности сегмента и высоких скоростях передачи могут появиться эффекты длинных линий. В этих случаях необходимо в соединениях использовать терминирующее сопротивление, номинал которого зависит от волнового сопротивления витой пары. Второй вариант — снижение скорости передачи ниже 9600 бит/с, на этих скоростях терминирующее сопротивление не нужно.

RS485 часто используется ПЛК для сбора данных с микропроцессорных датчиков, применяющих этот интерфейс связи.

Асинхронная передача данных. В общем случае для передачи данных по линиям связи RS232 и RS485 на канальном уровне используется асинхронный протокол передачи. Его применение накладывает требование согласования скоростей передачи всех абонентов, участвующих в передаче данных. Иными словами, у всех абонентов в сети должна быть установлена одна и та же скорость передачи данных.

При асинхронной передаче данные передаются побайтно, для облегчения нахождения начала и конца пакета к 8 информационным битам добавляют стартовый и стоповый бит. Стартовый бит имеет значение «0», а стоповый бит «1». Протокол также допускает использования двух стоповых битов, тогда они оба равны «1». Кроме этих бит может передаваться дополнительный проверочный бит, так называемый бит четности. Этот бит дополняет информационные биты до четного или не четного количества единиц, в зависимости от того, какая проверка ведется, на четность или нечетность. Такая проверка позволяет обнаруживать одиночные ошибки при передаче пакета.

Все эти параметры — количество стоповых бит, наличие проверочного бита и вид проверки так же должны быть согласованы для всех абонентов, участвующих в передаче данных.

Еще при асинхронной передаче данных возможна передача семи информационных бит вместо восьми — это так называемая передача с сокращенным словарем. Такая передача использовалась для передачи текстовых сообщений, содержащих только латиницу, а точнее сообщений, содержащих только первую половину таблицы символов. В эту половину как раз входят латинские символы, цифры и спецсимволы. В технике семибитная передача не используется.

Таким образом, самый простой случай передачи данных — один стартовый бит, восемь информационных и один стоповый. Для передачи 8 бит информации используется 10 бит, т. е. 20 % пропускной способности канала занимает служебная информация. В случае, когда используются два стоповых бита и бит проверки, служебная информация занимает треть пропускной способности канала.

6.3.2. Интерфейс USB

Полное название USB — *Universal Serial Bus* (универсальная последовательная шина). Это современный последовательный интерфейс, разработанный для персональных компьютеров. Как уже говорилось ранее, из-за специфики используется только для загрузки программы и настроек в ПЛК.

Специфика данного интерфейса заключается в том, что USB — опрашиваемая шина, любой обмен данными по ней инициализирует хост-контроллер. При этом хост-контроллер должен быть один, для всех объединенных через разветвители USB-устройств. Это затрудняет использование USB как интерфейса для передачи данных. Кроме того, длина кабеля USB довольно небольшая, до 5 м, далее требуется использование специальных повторителей, что, опять же, не очень удобно.

В итоге ПЛК выступает в этом обмене как USB-устройство, а не хост-контроллер.

6.3.3. Ethernet

Интерфейс Ethernet широко используется как в сетях персональных компьютеров, так и в промышленных сетях. На данный момент разработано большое количество разновидностей этого интерфейса, обладающие различными скоростями — от 10 Мбит/с до 10 Гбит/с, а также использующие различные среды передачи в виде витой пары и оптоволокна.

В ПЛК обычно реализованы версии 10Base-T (10 Мбит/с) и 100Base-T (100 Мбит/с), использующие для передачи данных две витых пары. Одна витая пара служит для приема, другая — для передачи информации, т. е. ведется полнодуплексный обмен данными. Современная компьютерная техника умеет самостоятельно определять, какая из пар подключена к передатчику, а какая — к приемнику, и автоматически их коммутирует нужным образом. В большинстве ПЛК эта функция не реализована, поэтому при подключении двух контроллеров напрямую друг к другу без участия концентратора необходимо поменять пары местами в одном из разъемов кабеля (такой кабель называется *crossover* — перекрестный кабель).

В качестве концентраторов для Ethernet сетей ПЛК могут применяться те же устройства, что и в бытовых компьютерных сетях. Для связи с оптоволоконными каналами, опять же используется оборудование самих оптоволоконных каналов. Следует помнить: несмотря на то, что в ПЛК реализован модуль Ethernet, работающий на скорости 10 или даже 100 Мбит/с, реальная скорость отдачи информации может быть значительно ниже. Это связано с внутренней пропускной способностью ПЛК, а также с возможностями его микропроцессора, которых часто не хватает для обеспечения скорости обмена даже в 10 Мбит/с. Но помимо этого важно помнить, что такие скорости обмена в общем случае от одного ПЛК и не требуются. Наоборот, нужно, чтобы ПЛК предварительно обрабатывал передаваемую информацию, с целью минимизации трафика данных.

Что касается протоколов, используемых для передачи данных, то чаще всего применяются TCP/IP или его вариации, адаптированные для работы в режиме реального времени. Часто TCP/IP используется как транспортный протокол, с помощью которого передаются пакеты данных уже специализированного протокола, разработанного для ПЛК и систем автоматики.

Также Ethernet нередко применяют для сбора информации с микропроцессорных датчиков, использующих этот интерфейс связи.

6.3.4. Модемное соединение по проводной линии и радиоканалу

Некоторые линии связи, например радиоканал, имеют ограниченную полосу пропускания. Цифровой сигнал передается по таким линиям с существенными искажениями, что делает такие линии не-

пригодными для передачи цифрового сигнала напрямую. Для передачи цифрового сигнала по таким линиям используют процедуру модуляции цифрового сигнала. На приемной стороне происходит процедура демодуляции.

Отсюда берет название оборудование связи для таких линий — модем. Название состоит из двух слов — «модулятор» и «демодулятор». Согласно определению, *модуляция* — это процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного модулируемого колебания под воздействием относительно низкочастотного управляющего модулирующего сигнала. В результате спектр управляющего сигнала переносится в область высоких частот, где передача электромагнитных сигналов посредством излучения более эффективна. Передаваемая информация заложена в управляющем сигнале. Роль переносчика информации выполняет высокочастотное колебание, называемое несущим. Чаще всего в качестве несущего применяются гармонические колебания с частотой, соответствующей пропускной полосе канала связи.

В качестве изменяемого параметра гармонического сигнала при модуляции могут выступать амплитуда, частота или фаза. Таким образом, различают три вида модуляции — *амплитудную, частотную и фазовую*. Как ясно из приведенного ранее определения, могут применяться сразу несколько типов модуляции, например, часто используется фазо-частотная модуляция.

Что касается среды передачи сигнала, то в ПЛК применяются проводные и радиомодемы. Некоторые производители ПЛК производят также радиомодемы для своих ПЛК. В этом случае все процедуры по ретрансляции сигнала при большой протяженности радиопространства решаются уже с помощью протокола для данных ПЛК. Если используется стороннее оборудование, то все вопросы ретрансляции должны решаться с его стороны, с точки зрения ПЛК этот радиоканал предстает единой линией связи, без ретрансляторов.

Проводные модемы делятся на несколько групп, в зависимости от вида проводного канала, с которым они работают. Наиболее часто используются модемы с собственной, отдельно прокладываемой линией связи, GPRS-модемы и модемы для коммутируемых линий. Последние на данный момент используются все меньше и только для специфических задач, не требующих высокой частоты опроса ПЛК. Кроме перечисленных линий связи, иногда используется соединение с помощью линий электросети ~220В, такой тип модемов называется PLC — *Power Line Communication*, что вносит некоторую путаницу в терминах. Наиболее часто он применяется в ПЛК, управляющих оборудованием системы «умный дом».

Модемы сторонних производителей чаще всего подключаются к ПЛК по RS232. Также необходимо отметить, что для работы с такими модемами часто приходится писать драйвер (управляющую

программу) внутри кода программы ПЛК, что сильно усложняет создание сети ПЛК.

6.4. Стандартные языки программирования логических контроллеров

В большинстве ПЛК для написания управляющей программы (программы пользователя) используются специальные языки программирования. Эти языки описываются в стандарте Международной электротехнической комиссии, МЭК 61131 или IEC 61131-3. В этом стандарте описано пять языков:

1) список инструкций (*Instruction List, IL*) — текстовый язык, команды похожи на команды языка ассемблер. Поскольку данный язык низкоуровневый, в настоящее время он редко применяется и в данном курсе рассматриваться не будет;

2) релейные диаграммы (*Ladder Diagram, LD*), или релейно-контактные схемы — графический язык программирования, представляющий собой программную интерпретацию релейно-контактных схем. В различной литературе данный язык может иметь другое название — релейная лестничная логика (*Relay Ladder Logic, RLL*);

3) функциональные блочные диаграммы (*Function Block Diagram, FBD*) — графический язык, каждый функциональный блок (ФБ) которого представляет собой некую подпрограмму и имеет выходы и входы, программа создается последовательным соединением ФБ в строках;

4) последовательные функциональные диаграммы (*Sequential Function Chart, SFC*) — графический язык программирования высокого уровня. Программа состоит из некоторого количества состояний и условий перехода между ними;

5) структурированный текст (*Structured Text, ST*) — текстовый язык, очень похожий на классический язык программирования Pascal.

В ПЛК могут применяться и другие языки программирования, например C/C++, ассемблер, C#, Visual Basic и т. д. Их использование встречается не так часто и каждый раз сильно связано с аппаратной базой конкретного ПЛК, поэтому в рамках данного курса они рассматриваться не будут.

Некоторые ПЛК поддерживают несколько языков программирования, но, как правило, есть основной язык и поддерживаемые частично. Например, ПЛК Omron CP1L позволяет писать функциональные блоки для своей программы на языках LD и ST, но основная программа пишется только на LD. Другой пример: ПЛК Motorola серий как MOSCAD, так и ACE3600, позволяют описывать функции для своей программы на языке C, но основная программа также пишется только на LD.

В графических языках программирования программа строится из набора готовых компонент. При этом для разных контроллеров набор может быть разным, несмотря на то, что сам язык будет одним и тем же. Общие функции проверки условий и стандартные инструкции для всех одинаковы, но наличие или отсутствие специфических инструкций определяют уже возможности конкретного ПЛК. Например, если ПЛК может оперировать только с целыми числами, набор его математических функций будет гораздо меньше, чем у ПЛК, оперирующего числами с плавающей точкой. Кроме того, некоторые инструкции могут быть напрямую связаны с ОС или аппаратной реализацией ПЛК — соответственно они уникальны для конкретной модели ПЛК. Аналогично и текстовые языки программирования имеют общие функции и функции, уникальные для конкретной модели ПЛК.

Необходимо также отметить, что управляющая программа или программа пользователя в ПЛК выполняется циклически, т. е. с точки зрения программиста, дойдя до конца программы, ПЛК запускает ее заново. Это не совсем так, поскольку между завершением программы и повторным ее запуском контроллер выполняет некоторое количество функций, связанное с внутренними задачами ПЛК (рис. 6.9).

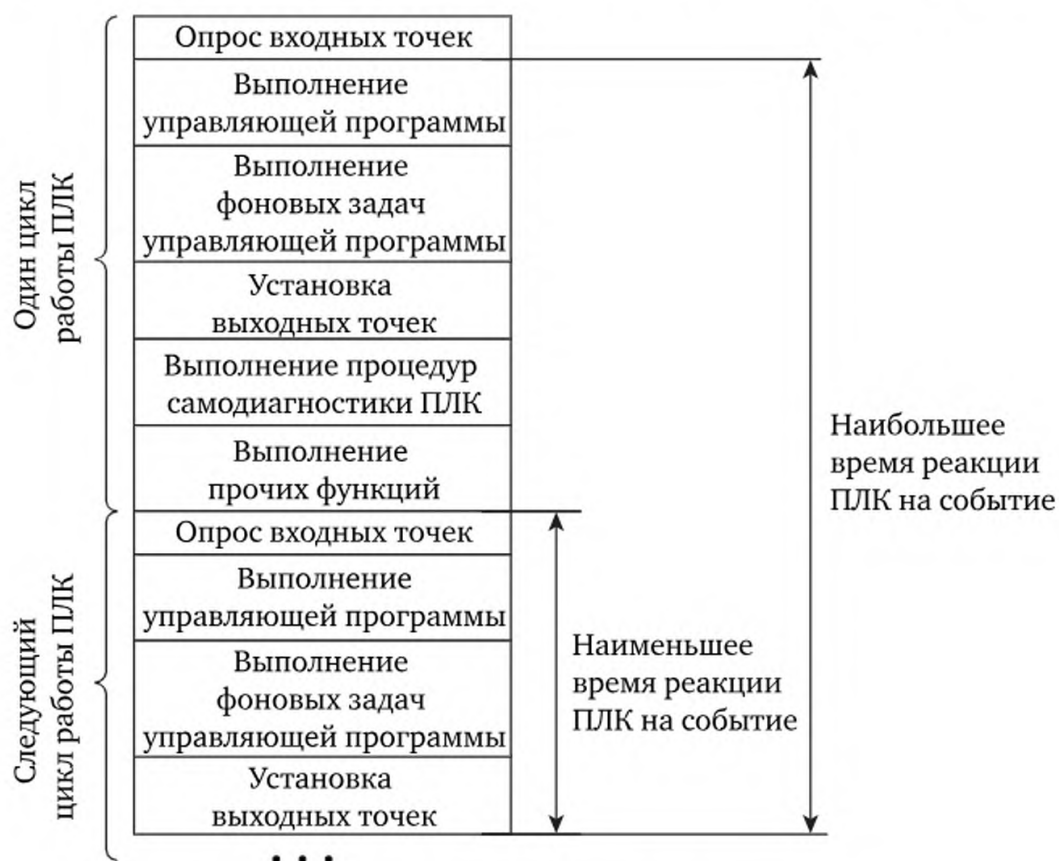


Рис. 6.9. Циклический принцип работы ПЛК

Таким образом, ПЛК циклически выполняет некоторый набор операций, одна из которых — выполнение управляющей программы. Со-

став этого набор операций зависит от сложности ПЛК, в простейшем случае он включает опрос входов, выполнение управляющей программы, установку выходов и выполнение самодиагностики.

Все выполняемые операции имеют ограничение на время выполнения. В случае превышения этого времени какой-либо задачей ОС ПЛК снимает эту задачу и регистрирует ошибку в системном журнале. Об этом следует помнить при составлении управляющей программы для ПЛК, если она превысит отведенное на эту операцию время, то будет завершена аварийно, со сбросом всех параметров. Максимальное время, отведенное на выполнение программы пользователя, может быть от нескольких миллисекунд до нескольких сотен миллисекунд. Это время индивидуально для конкретной модели контроллера и должно быть указано в руководстве к ПЛК. Некоторые ПЛК имеют специальные инструменты для отслеживания времени выполнения управляющей программы.

В любом случае даже сложные управляющие программы выполняются быстро и не превышают лимит времени. Обычно превышение времени возникает при использовании слишком длительных циклов в управляющей программе или при синхронном вводе/выводе большого объема данных. Таких ситуаций при написании программы лучше избегать, большие циклы можно организовывать, опираясь на то, что управляющая программа является одной из задач, циклически выполняемых ПЛК. Точно так же ввод/вывод большого объема данных можно выполнять поэтапно. У некоторых ПЛК для этого предусмотрены специальные функции, выполняющиеся в фоновом режиме в специально отведенный для этого промежуток времени.

Время выполнения каждой из циклически выполняемых операций в некоторых ПЛК может жестко соблюдаться. Иными словами, если операция закончилась раньше установленного лимита, следующая все равно не начнется, пока не кончится лимит времени. В большинстве ПЛК общий цикл гибкий, т. е. как только закончилось выполнение текущей операции, начинается выполнение другой.

В связи с циклическим принципом работы ПЛК возникают понятия минимального (наилучшего) и максимального (наихудшего) времени реагирования на событие (см. рис. 6.9). Для ПЛК с жестким соблюдением времени цикла эти величины постоянны и указаны в руководстве. У ПЛК с гибким циклом эти времена зависят от сложности управляющей программы, количества опрашиваемых модулей ввода/вывода, количества передаваемых данных и т. п. В некоторых ПЛК есть инструменты для уменьшения этих времен. Например, у ПЛК *Motorola* серий MOSACD и ACE3600 есть команда опроса входов и выставления выходов. Таким образом, один и тот же вход может быть опрошен несколько раз во время исполнения управляющей программы. Аналогично может быть несколько раз изменено значение выхода.

6.4.1. Релейные диаграммы

Как уже было сказано ранее, язык релейных диаграмм — это графический язык программирования, который является программной интерпретацией релейно-контактных схем. Он был специально разработан для упрощения перехода специалистов по построению систем автоматики на основе релейно-контактных схем к применению ПЛК. Несмотря на то, что на данный момент программированием ПЛК уже занимаются программисты, этот язык очень часто применяется в ПЛК.

Программа в таком языке собирается из набора компонент, делящихся на условия и инструкции, в некоторых ПЛК также возможно написание своих исполняемых функций. Условия подсоединяются к общей «питающей» линии (*power rail*) в необходимом порядке последовательно или параллельно. Последовательное соединение условий объединяет их логически по И, параллельное — по ИЛИ. Далее к конструкции условий подсоединяются инструкции, которые необходимо выполнить при выполнении конструкции условий. Допускается безусловное исполнение инструкций, но не у всех ПЛК. В некоторых ПЛК безусловные инструкции допускаются только в начале программы, это зависит от реализации интерпретатора/компилятора языка LD для данного ПЛК. В итоге строки программы выглядят как ответвления от «питающей» линии (рис. 6.10).

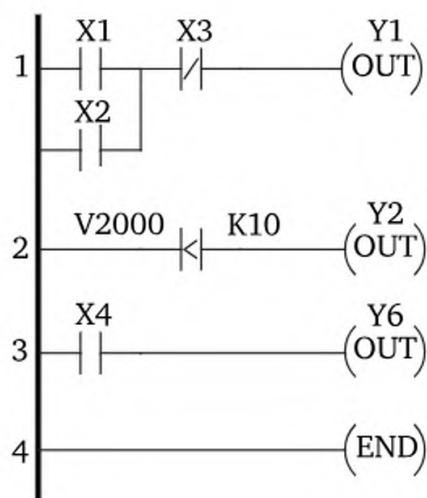


Рис. 6.10. Программа на языке релейных диаграмм на примере ПЛК *Koyo DL205*

У ПЛК *Koyo DL205* дискретные входные точки обозначаются «X + номер точки», дискретные выходные точки — «Y + номер точки», нумерация идет, начиная от 0. Таким образом, в первой строке программы на рис. 6.10 реализовано условие $(X1 \text{ or } X2) \text{ and } \overline{X3}$, т. е. условие: если включен вход X1 или включен вход X2 и выключен вход X3. При его выполнении включается дискретный выход Y1, при невыполнении этот дискретный выход выключается. Во второй

строке записано условие $V2000 < K10$, т. е. содержимое ячейки памяти по адресу V2000 должно быть меньше константы, равной 10. При выполнении этого условия включается дискретный выход Y2.

Принцип работы языка LD похож на работу электроцепи, питающие напряжение проводится или не проводится условиями к инструкциям. Соответственно инструкции запрашиваются или нет. Но есть существенная разница: в реальных схемах цепи запрашиваются параллельно и, следовательно, работают параллельно, в LD все строки выполняются последовательно, сверху вниз, до конца программы. Кроме того, синтаксис несколько шире элементной базы релейно-контактных схем. Например, есть операторы установки в «1» или сброса в «0», а не только имитирующие обмотку реле, как в примере на рис. 6.10. Кроме того, для измерения интервалов времени есть таймеры, а для подсчета количества импульсов — счетчики.

В базовом виде язык LD не предусматривает какой-либо организации программы, кроме переходов. В отсутствие переходов все ветви программы идут последовательно друг за другом и так же выполняются. Некоторые производители добавляют свои элементы организации программы. Например, в ПЛК *Кoyo DL205* программу на LD можно разбить на стадии, в этом случае будут выполняться только активные стадии программы. Между стадиями возможны переходы, тогда стадия, с которой происходит переход, становится неактивной, а та, на которую переходят, — активной. Флаги активности стадий также можно устанавливать или сбрасывать как дискретные выходы. Другой пример: в ПЛК *Motorola MOSACD* и *ACE3600* программа на LD делится на процессы, основной процесс выполняется всегда, а в дополнительные можно переходить из основного процесса, получается что-то вроде вызова подпрограмм. Кроме того, есть возможность запускать до четырех дополнительных процессов параллельно на выполнение.

В заключение нужно отметить, что данный язык является достаточно простым для освоения. Небольшие программы, написанные на нем, легко читаются, большинство ПЛК позволяют проводить онлайн мониторинг таких программ. Но при увеличении сложности программы она становится все более трудночитаемой и сложной для мониторинга и редактирования, поскольку сам «код» программы визуально занимает много места и на экране монитора одновременно могут быть отображены лишь несколько строк.

6.4.2. Функциональные блок-диаграммы

Как уже было сказано ранее, язык блок-диаграмм — это графический язык программирования. Этот язык сильно напоминает принципиальные схемы на основе микросхем. В отличие от LD, где соединения между элементами «передают» питающее напряже-

ние, здесь соединения могут передавать любые виды информации. Шины питания здесь нет, поскольку входом для схемы, опять же, является информация.

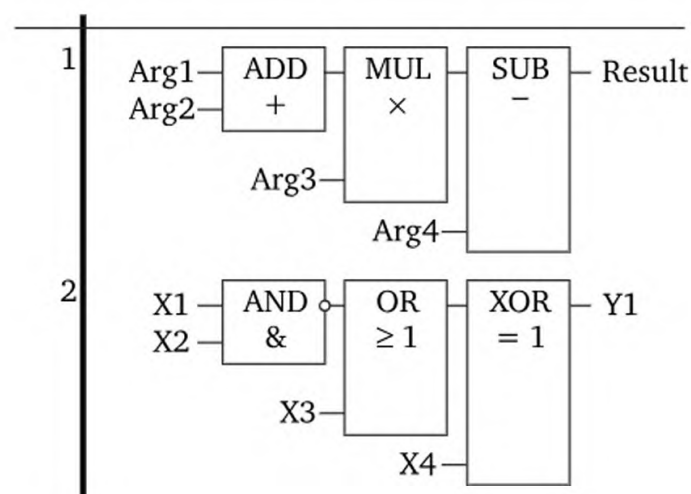


Рис. 6.11. Программа на языке функциональных блоковых диаграмм на примере среды CODESYS

На рис. 6.11 реализованы две строки программы на FBD. В первой реализуется арифметическое выражение

$$Result = (Arg1 + Arg2) \cdot Arg3 - Arg4.$$

Во второй строке реализуется логическое выражение

$$Y1 = \overline{(X1 \text{ and } X2)} \text{ or } X3 \text{ xor } X4.$$

Строки программы выполняются последовательно сверху вниз, элементы в строке выполняются также последовательно слева направо. Некоторые среды программирования допускают создания сложных строк, как показано на рис. 6.12. В данном случае порядок выполнения элементов будет определяться последовательностью соединения. На рис. 6.12 порядок следующий: Function 1, Function 2, Function 3 и Function 4.

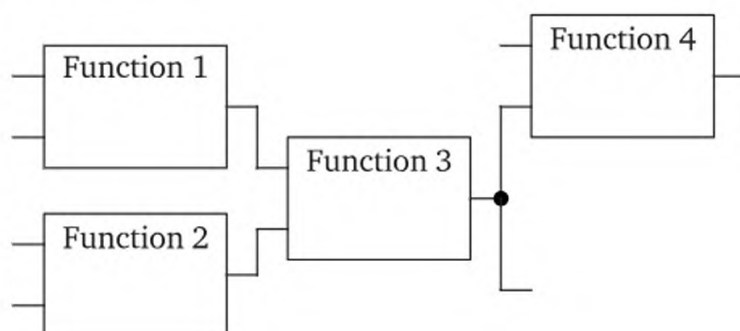


Рис. 6.12. Сложные строки в FBD

В базовый набор функций входят арифметические и логические операции, таймеры и счетчики, операторы установки в «1» и сброса в «0». Если говорить о конкретных реализациях для определенной модели ПЛК, то, опять же, могут быть различные варианты исполнения. Например, для целых типов данных и типов данных с плавающей точкой могут быть разные арифметические функции, при этом будут функции конвертации одного типа данных в другой. Также могут быть специальные функции, связанные с аппаратной частью или ОС ПЛК.

Так же, как и язык LD в базовом виде, язык FBD не предусматривает какой-либо организации программы, кроме переходов.

В заключение нужно отметить, что данный язык имеет фактически все те же преимущества и недостатки что и LD. Небольшие программы легко читаются и отлаживаются, но длинные программы визуально занимают очень много места. Поскольку на экране помещается всего несколько строк, отладка и редактирование таких программ затруднена.

6.4.3. Последовательные функциональные диаграммы

Язык последовательных функциональных диаграмм тоже является графическим языком, но, в отличие от двух предыдущих, это язык более высокого уровня. Он не содержит каких-либо операторов и инструкций, все, что в нем есть, — это так называемые состояния и условия перехода между ними.

Данный язык предназначен для структурирования и организации программы. Предполагается, что все действия внутри конкретного состояния описываются на другом языке стандарта МЭК. Пример программы на SFC приведен на рис. 6.13.

В данном случае программа имеет шесть состояний, начинается с состояния Init и сразу безусловно переходит в состояние Step0. Далее при равенстве логической переменной Flag0 значению True происходит переход на разветвление. При равенстве переменной X значению 1 происходит переход программы в состояние Step1, а затем по флагу Flag1 — в состояние Step2 и по флагу Flag2 происходит возврат в стадию Init. При равенстве переменной X значению 2 программа идет по альтернативной ветви, в которой состояния Step3 и Step4 активируются параллельно, а дальнейший переход в стадию Init происходит при одновременном равенстве переменных Flag3 и Flag4 значению True.

Как уже было сказано, внутри каждого состояния находится программа на другом языке МЭК. На каждом цикле своей работы при выполнении управляющей программы ПЛК выполняет только содержимое активных состояний. Неактивные состояния пропускаются.

В заключение нужно отметить, что данный язык очень сильно способствует структуризации программы и разбиению ее на от-

дельные этапы. Однако реализация управляющей программы таким способом требует продумывания заранее всех возможных состояний объекта управления и условий переходов между ними. Это довольно сложно для людей, не очень хорошо знакомых с программированием, и требует некоторой предварительной практики использования. Кроме того, данный язык редко реализуется в ПЛК, некоторые производители заменяют его своей организацией стадий, процессов и т. п. в других языках МЭК.

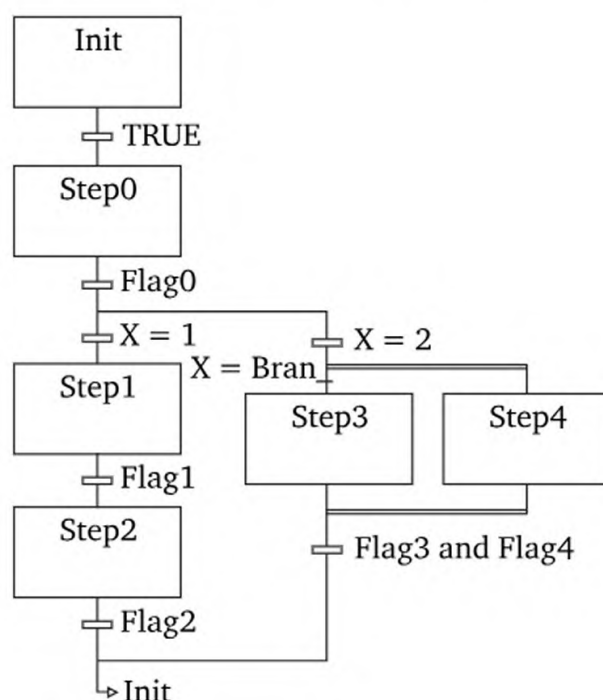


Рис. 6.13. Программа на языке последовательных функциональных диаграмм на примере среды CODESYS

6.4.4. Структурированный текст

Структурированный текст — текстовый язык, по синтаксису команд очень похожий на классический язык программирования для персональных компьютеров *Pascal*. Пример программы на этом языке приведен на рис. 6.14.

В первой строке реализуется логическое выражение из примера для FBD $Y1 = (X1 \text{ and } X2) \text{ or } X3 \text{ xor } X4$. Далее проверяется результат $Y1$, если получилось True, переменной *Resul* присваивается значение 5, в противном случае присваивается 1.

В отличие от *Pascal*, в структурированном тексте имеются реализации таймеров и счетчиков. Они выполнены в виде вызываемых функций, для которых переменные, запускающие таймер, являются входными параметрами. Перед использованием в программе экземпляр такой функции должен быть объявлен в секции VAR. В этом языке также могут быть специальные функции, связанные с аппа-

ратной частью или ОС ПЛК. При использовании таких функций их экземпляры точно также объявляются в секции VAR.

```
1  PROGRAM PLC_PRG
2  VAR
3      X1,X2,X3,X4,Flag1:BOOL;
4      Resul: INT;
5  END_VAR

1  Y1:=NOT (X1 AND X2) OR X3 XOR X4;
2  IF Y1 THEN
3      Resul:=5;
4  ELSE
5      Resul:=1;
6  END_IF;
```

Рис. 6.14. Программа на языке «структурированный текст»
на примере среды CODESYS

В заключение нужно отметить, что данный язык наиболее прост в освоении для людей, имеющих навыки программирования на языках для персональных компьютеров.

6.5. Примеры программируемых логических контроллеров

В данном параграфе приводятся примеры различных ПЛК разных производителей. Основной целью является практическое подкрепление изложенной выше информации, а также демонстрации ПЛК различной сложности. Поэтому многие характеристики ПЛК, такие как разрядность оцифровки аналоговых данных, размеры ОЗУ и ПЗУ и т. п. характеристики здесь отсутствуют. Все эти данные можно узнать из руководства для данных ПЛК.

Кроме того, утилиты для работы с ПЛК также не рассматриваются подробно, поскольку каждый ПЛК имеет свою специфику по настройке и программированию. Поэтому не имеет смысла подробно изучать принципы настройки ПЛК, с которыми не предполагается дальнейшая работа.

6.5.1. Внешние модули ввода/вывода ADAM

Внешние модули ввода/вывода предназначены для сбора данных с датчиков, подключаемых к входам модуля, и последующей их передачи по протоколу MODBUS. В случае наличия выходов у модуля, принимают управляющие команды по тому же протоколу и направляют полученные значения на свои выходы. Если входы/вы-

ходы аналоговые, то внутри модуля проводится АЦП/ЦАП преобразование.

Существует два вида таких модулей, различаются они интерфейсом связи. Одна группа передает данные по Ethernet, а другая — по RS485. В первом случае используется протокол MODBUS TCP, во втором — MODBUS RTU.

Пример модуля с интерфейсом Ethernet показан на рис. 6.15.

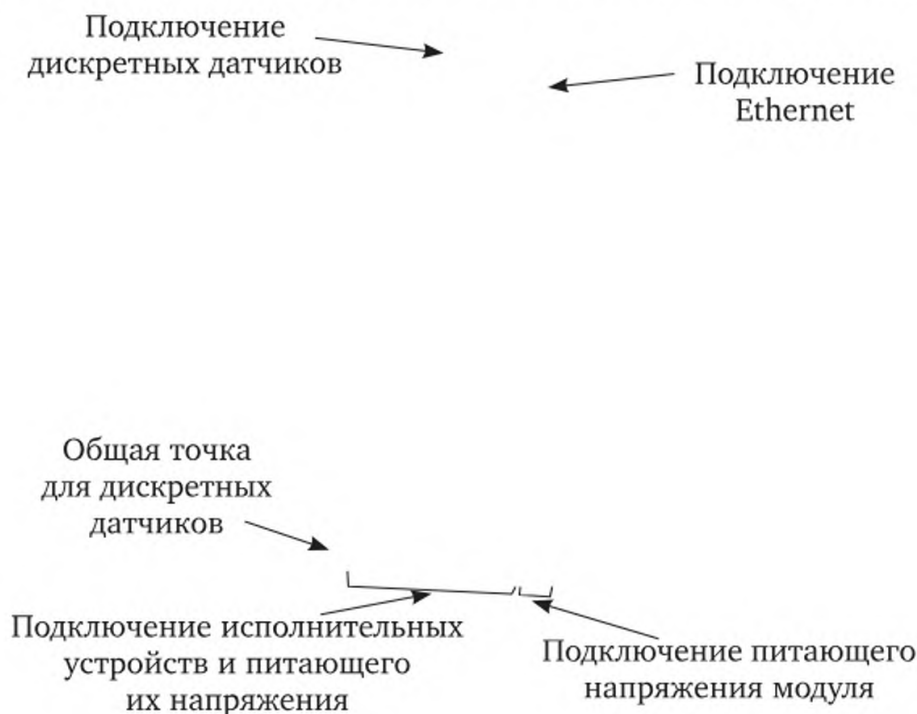


Рис. 6.15. Внешний модуль ввода/вывода ADAM-6052

Модули ввода/вывода с дискретными входами и выходами могут реализовывать некоторую обработку получаемых данных и отправлять результат на свои выходы или даже выходы другого модуля. В этой обработке предусмотрены 16 правил обработки для одного модуля. Одно правило содержит операцию И/ИЛИ, возможно с инверсией результата, между тремя дискретными величинами и отправку результата трем получателям. В качестве входных величин могут учувствовать текущие состояние входов самого модуля и результаты работы таймеров или счетчиков, привязанных к какому-либо входу модуля. В качестве получателей могут выступать выходы самого модуля или выходы другого модуля, находящегося с текущим в одной сети. Пример такого правила показан на рис. 6.16.

Таким образом, данные дискретные модули могут реализовывать простейшую логику управления. У модулей с аналоговыми входами/выходами такая возможность отсутствует.

Сама среда настройки предназначена для установки адресов модулей. Для модулей с интерфейсом Ethernet устанавливается IP-адрес, а для модулей с RS485 — MODBUS-адрес. Кроме того, в дан-

ной утилите можно посмотреть текущее состояние входов и выходов модуля.

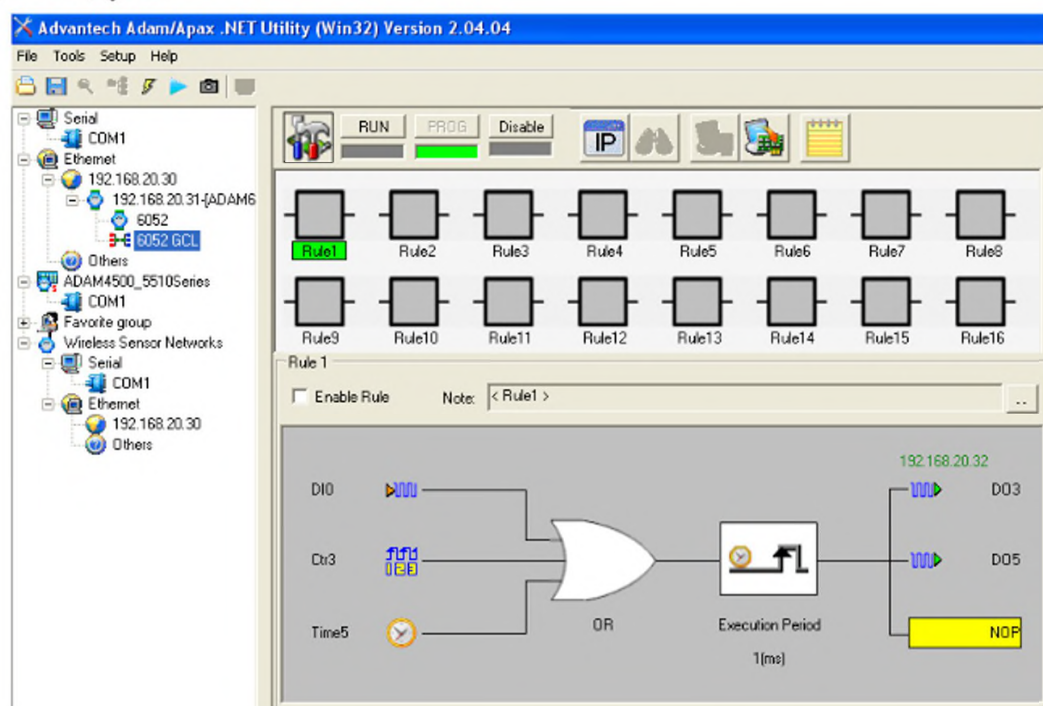


Рис. 6.16. Среда настройки модулей ввода/вывода ADAM на примере ADAM-6052

6.5.2. Микроконтроллеры серии DL205 фирмы KOYO

Микроконтроллеры серии DL205 предназначены для локальной автоматизации, выпускаются они японской фирмой KOYO. Модуль ЦПУ из интерфейсов связи имеет только RS232, но есть модули расширения, поддерживающие различные интерфейсы, такие как RS485, Ethernet и т. п. Эти модули устанавливаются в слоты для модулей ввода/вывода. Порты модуля ЦПУ используются в основном для соединения с ПК, при программировании ПЛК.

Для данных ПЛК выпускается несколько вариантов баз — на 3, 4, 6 и 9 слотов. База выпускается вместе с блоком питания. В крайний левый слот всегда ставится модуль ЦПУ, остальные занимают модулями ввода/вывода и коммуникационными модулями по необходимости. Для данных ПЛК выпускаются несколько различных модулей ПЦУ, они различаются вычислительными возможностями и наличием или отсутствием поддержки некоторых протоколов связи. Пример ПЛК серии DL205, с модулем ЦПУ DL240 показан на рис. 6.17.

Для программирования и диагностики используется утилита DirectSOFT, разработанная производителем ПЛК. Программа для этих ПЛК составляется на языке LD. Других языков эти ПЛК не поддерживают, но для организации сложных программ в язык LD добавлены стадии, некоторый эквивалент языка SFC. Для обозначения стадий и перехода между ними используются специальные операторы. Стадии могут быть активны или неактивны. При переходе

из активной стадии в какую-либо другую стадию, с которой осуществляется переход, помечается как неактивная, а стадия, на которую переходят, — как активная. ЦПУ выполняет только строки активных стадий.



Рис. 6.17. Устройство ПЛК Direct LOGIC серии DL205 фирмы KOYO

Окно утилиты программирования ПЛК DL205 показано на рис. 6.18.

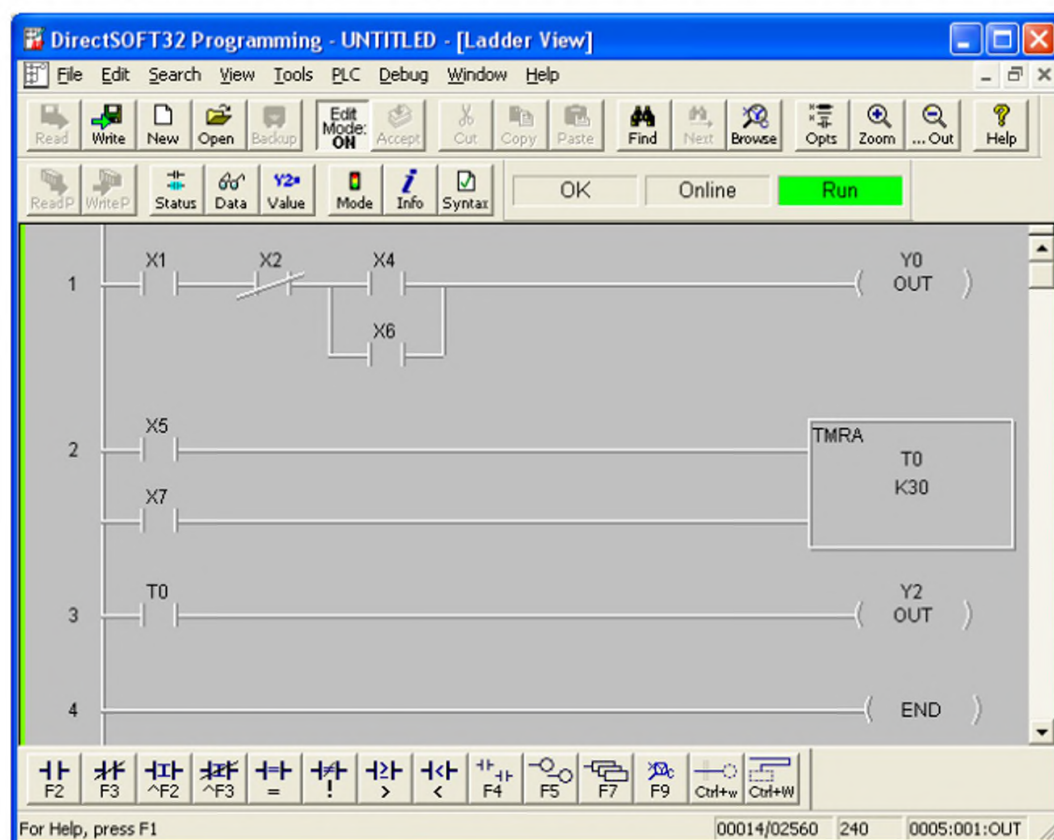


Рис. 6.18. Среда программирования ПЛК Direct LOGIC на примере серии DL205

В данном ПЛК дискретные точки входов/выходов нумеруются автоматически, входам даются имена X, выходам — Y. Нумерация идет в восьмеричной системе исчисления, начиная с нуля. Аналоговые входы/выходы связываются специальными настройками с ячейками памяти, эти настройки проводятся из самой программы LD. Данные ПЛК оперируют только целыми числами, поэтому при делении получается операция деления нацело, при этом остаток заносится в специальную ячейку.

6.5.3. Микроконтроллеры серии CP1L фирмы Omron

Микроконтроллеры серии CP1L предназначены для локальной автоматизации. Выпускаются японской фирмой Omron. Модуль ЦПУ изготавливается в одном корпусе с блоком питания и некоторым количеством точек ввода/вывода. По умолчанию из коммуникационных портов у модуля ЦПУ есть либо USB, либо Ethernet, в зависимости от модели ЦПУ. Кроме того, ЦПУ имеет один или два слота для дополнительных плат, в качестве которых могут выступать коммуникационные модули RS232/RS485 и Ethernet. Также есть дополнительные платы, реализующие аналоговые точки входа/выхода.

К модулю ЦПУ можно подключать дополнительные модули ввода/вывода по специальному шлейфу. Также по этому шлейфу подключаются специальные модули расширения, например модуль специальной шины DeviceNet. К модулю ЦПУ на 30, 40 или 60 точек ввода/вывода может быть подключено до трех модулей расширения или дополнительных модулей ввода/вывода, а к модулю ЦПУ на 20 или 14 точек ввода/вывода — один модуль расширения или дополнительный модуль ввода/вывода.

Пример ПЛК Omron CP1L с портом Ethernet, а также примеры возможных расширений приведены на рис. 6.19.

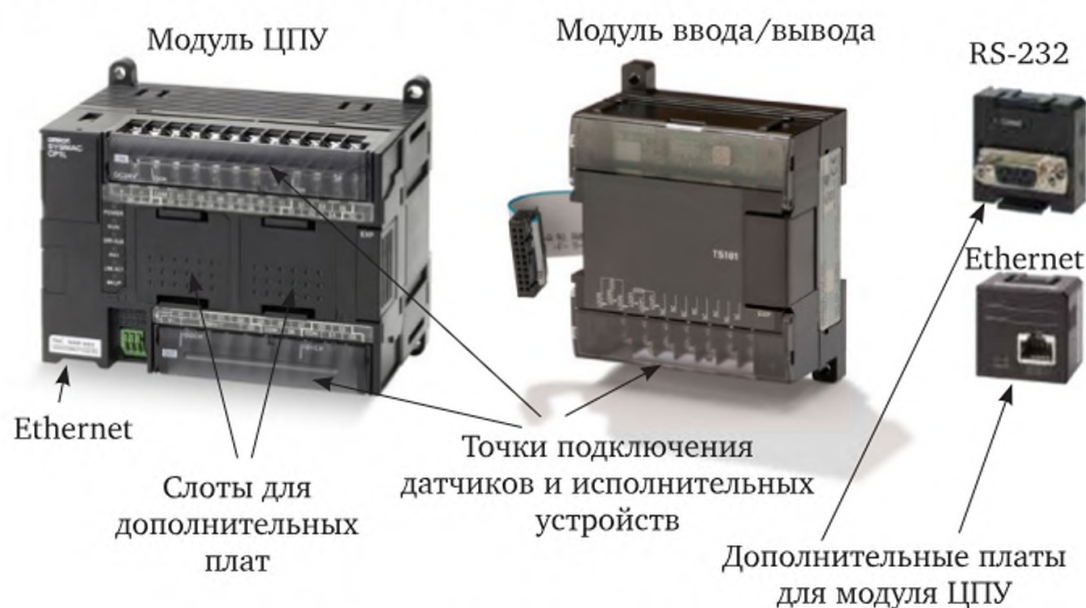


Рис. 6.19. Устройство ПЛК CP1L фирмы Omron

Для программирования и диагностики используется утилита CX-Programmer, разработанная производителем ПЛК. Программа для этих ПЛК составляется на языке LD, но есть возможность создания функциональных блоков на языке ST. Функциональные блоки также могут быть написаны на LD.

Окно утилиты программирования ПЛК CP1L показано на рис. 6.20.

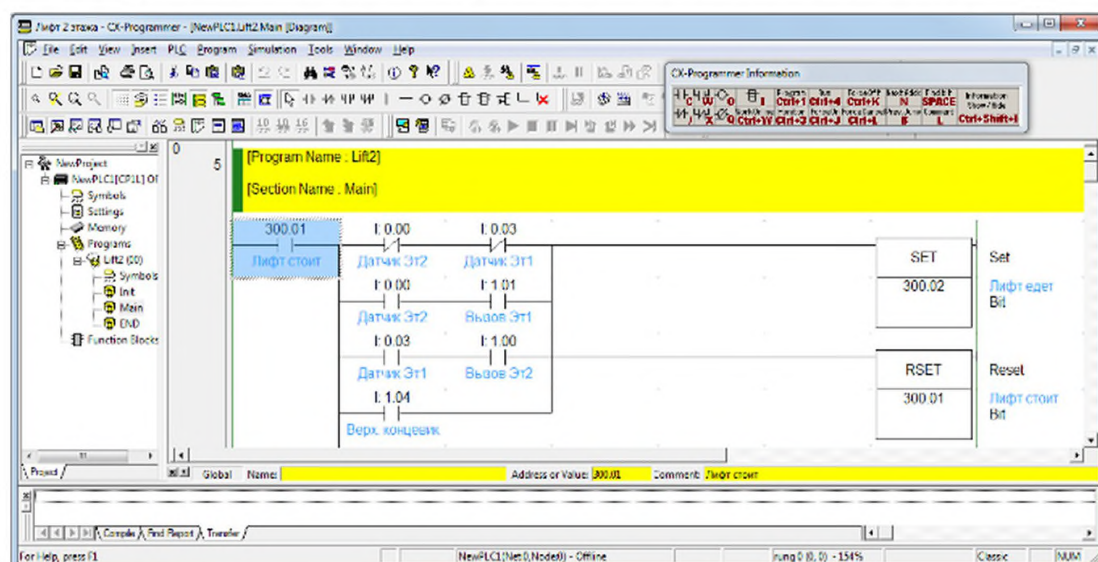


Рис. 6.20. Среда программирования ПЛК фирмы Omron на примере CP1L

В данном ПЛК точки входов/выходов имеют заранее заданную нумерацию. Эта нумерация указана на самой точке входа или выхода на корпусе контроллера.

6.5.4. Микроконтроллеры серии MOSCAD фирмы Motorola

Микроконтроллеры серии MOSCAD — это программируемые логические контроллеры, выпускаемые израильским подразделением фирмы Motorola. Изначально они ориентированы на применение в системах автоматизации, распределенных по большой территории либо имеющих разветвленную систему связи. Производитель предлагает не только сами контроллеры, но и проводные модемы, а также радиомодемы для них.

Существует две модификации данных ПЛК — стандартная версия MOSCAD и упрощенная версия MOSCAD-L. Программируемые логические контроллеры MOSCAD имеют различные варианты базы, на различное количество модулей ввода/вывода. Максимальное количество модулей на один ЦПУ равно 15, для подключения следующих 15 модулей нужно установить еще один модуль ЦПУ. Всего таких расширений может быть 15, итого на одном ПЛК может быть установлено до 240 модулей (одна основная база на 15 модулей плюс еще 15 дополнительных). Пример ПЛК MOSCAD стандартной версии с базой на два модуля ввода/вывода приведен на рис. 6.21.

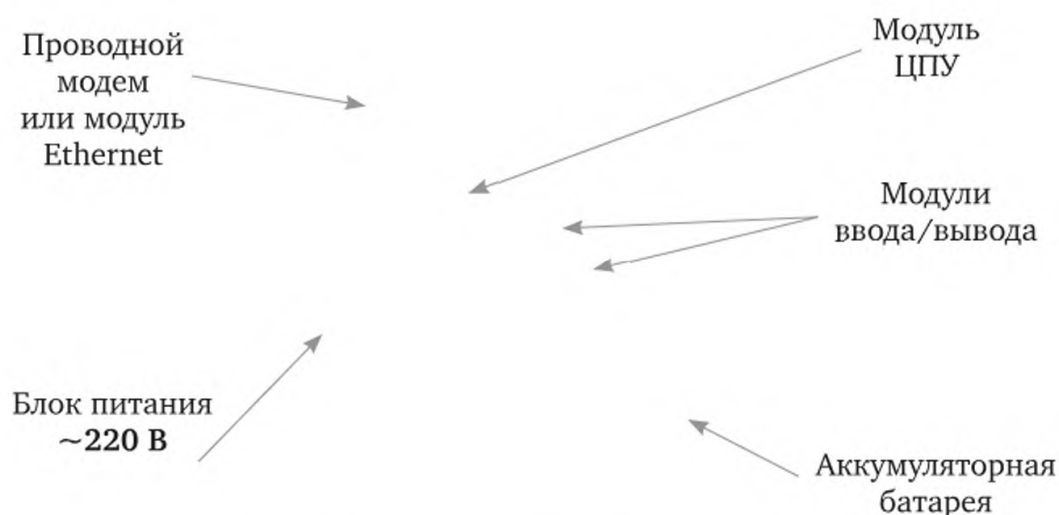


Рис. 6.21. Устройство ПЛК MOSCAD фирмы *Motorola*

Программируемый логический контроллер MOSCAD-L имеет только один вариант базы — на три модуля. Пример такого ПЛК приведен на рис. 6.22.

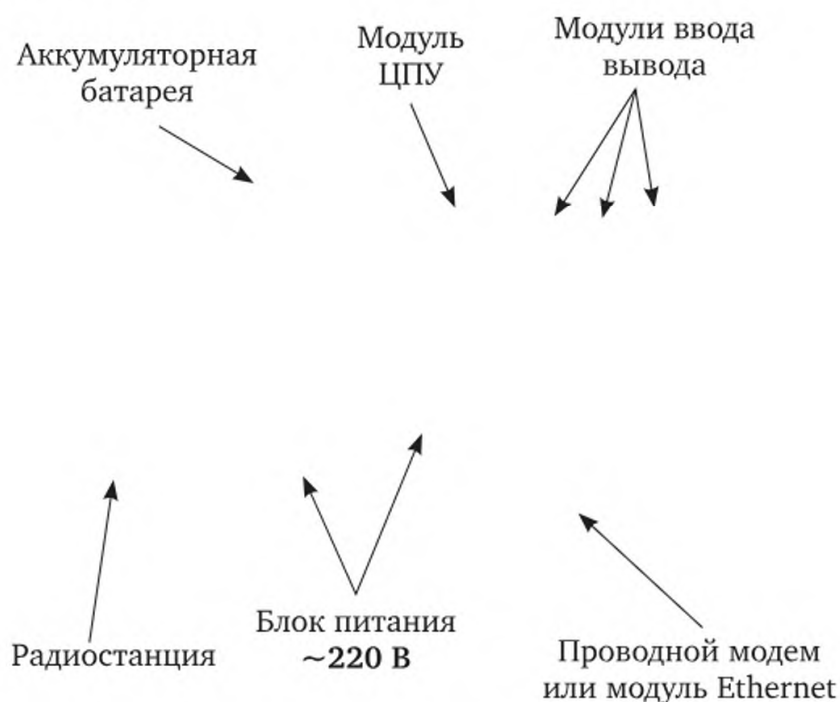


Рис. 6.22. Устройство ПЛК MOSCAD-L фирмы *Motorola*

В обеих модификациях модуль ЦПУ имеет два коммуникационных порта последовательной передачи данных. Первый порт может работать как с интерфейсом RS232 (Port 1B), так и с RS485 (Port 1A). Одновременная работа по обоим интерфейсам невозможна. Второй порт работает только по RS232. Кроме них есть еще слот расширения, в который возможна установка дополнительного порта RS232 или RS485, а также модуля для радио- или проводного мо-

дема или внутреннего модуля Ethernet. У данных ПЛК, кроме того, есть внешний модуль Ethernet, подключаемый к порту RS232. Установка двух модулей Ethernet на один ПЛК невозможна.

Данные ПЛК более сложные, чем рассмотренные ранее, и требуют дополнительных настроек при эксплуатации. В качестве протокола передачи данных между контроллерами и на верхний уровень распределенной системы используется собственная разработка фирмы *Motorola* — протокол MDLC (*Motorola Data Link Communication*). Для корректной работы сети ПЛК необходимо настроить не только линии связи каждого ПЛК, но и составить и загрузить во все ПЛК таблицу маршрутизации. Также для контроллеров, использующих Ethernet, необходимо составить и загрузить в них таблицу конвертации IP-адресов в адреса MDLC. Для всего этого производитель разработал пакет утилит, называемый MOSCAD Programming Toolbox. Для каждой из перечисленных задач в нем есть своя утилита.

Программа для ПЛК создается с помощью утилиты Application Programmer, окно которой приведено на рис. 6.23.

В данном ПЛК точки входов/выходов могут быть привязаны к любым переменным соответствующего типа. Переменные создаются во вкладке Database и связываются с определенной точкой входа/выхода во вкладке I/O Link. В приведенном на рис. 6.23 примере дискретные входы связаны с вектором переменных di , дискретные выходы — с do , а аналоговый вход — с переменной t_grad .

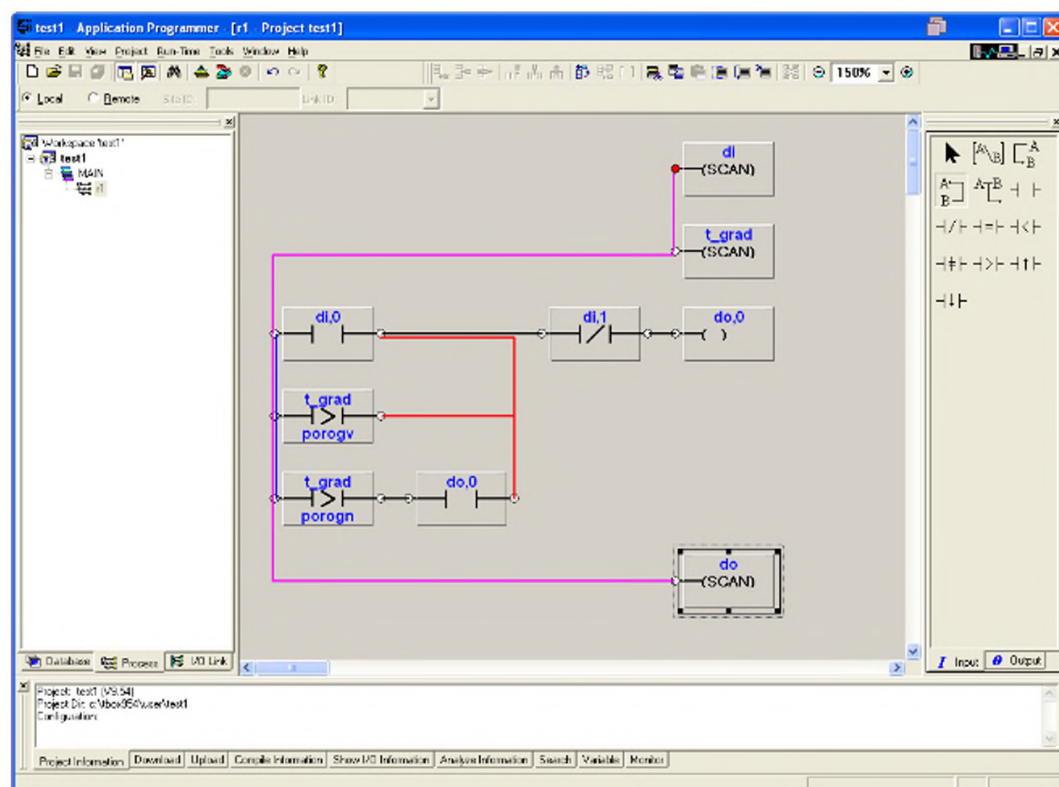


Рис. 6.23. Окно утилиты Application Programmer ПЛК MOSCAD

6.5.5. Микроконтроллеры серии ACE3600 фирмы *Motorola*

Микроконтроллеры серии ACE3600 выпущены для замены ПЛК серий MOSCAD и MOSCAD-L. На момент написания курса ПЛК MOSCAD были сняты с производства, но все еще были в продаже. *Motorola* принимала заказы только на ПЛК серии ACE3600. В качестве дополнительного оборудования связи производитель предлагает только радиомодемы для них.

Для ПЛК этой серии выпускается два различных ЦПУ, различающиеся наличием или отсутствием встроенного порта Ethernet. Все остальные характеристики и порты связи/расширения у этих ЦПУ одинаковы. В общем случае модуль ЦПУ содержит два порта последовательной передачи данных и два слота расширения. Первый последовательный порт может работать как с интерфейсом RS232, так и с RS485, второй порт работает только по RS232. В слоты расширения могут быть установлены интерфейсные платы для организации дополнительных коммуникационных портов, таких как RS232, RS485 и Ethernet. Во втором слоте расширения скорость Ethernet ограничена 10Мбит/с, тогда как первый порт и встроенный порт Ethernet поддерживают скорость 100Мбит/с.

Максимальное количество модулей ввода/вывода на один ЦПУ равно восьми, для подключения дополнительных модулей необходимо использовать ЦПУ со встроенным модулем Ethernet. К этому ЦПУ с помощью Ethernet подключается дополнительная база с установленным на ней специальным ЦПУ. Таким образом, можно увеличить количество модулей ввода/вывода на еще восемь. При необходимости большего количества модулей используют специальные разветвители Ethernet, которые устанавливаются вместо модулей ввода/вывода в базу с основным ЦПУ.

Пример ПЛК ACE3600 с базой на три модуля ввода/вывода приведен на рис. 6.24.



Рис. 6.24. Устройство ПЛК ACE3600 фирмы *Motorola*

Данные ПЛК, так же как и ПЛК серии MOSCAD, требуют дополнительных настроек при эксплуатации. В качестве протокола передачи данных между контроллерами и на верхний уровень распределенной системы используется протокол MDLC. Таблица маршрутизации теперь создается автоматически, но можно составить свою, исключив или добавив маршруты. В остальном все так же необходимо настроить линии связи каждого ПЛК, составить таблицу конвертации IP-адресов в адреса MDLC для контроллеров, передающих данные через Ethernet. Для этого производитель предоставляет вместе с ПЛК пакет утилит, называемый System Tools Suite (STS). Все утилиты по настройке ПЛК теперь представлены одним приложением, так и называемым — STS. Отдельно вынесены утилиты для настройки связи с ПЛК, создания управляющей программы и прослушивания канала связи.

Программа для ПЛК создается с помощью утилиты Application Programmer, окно которой приведено на рис. 6.25.

Как и у ПЛК MOSCAD, точки входов/выходов могут быть привязаны к любым переменным соответствующего типа. Переменные создаются во вкладке Database и связываются с определенной точкой входа/выхода во вкладке I/O Link. В приведенном на рис. 6.25 примере дискретные входы связаны с вектором переменных di, дискретные выходы — с do, а аналоговый вход — с переменной ai.

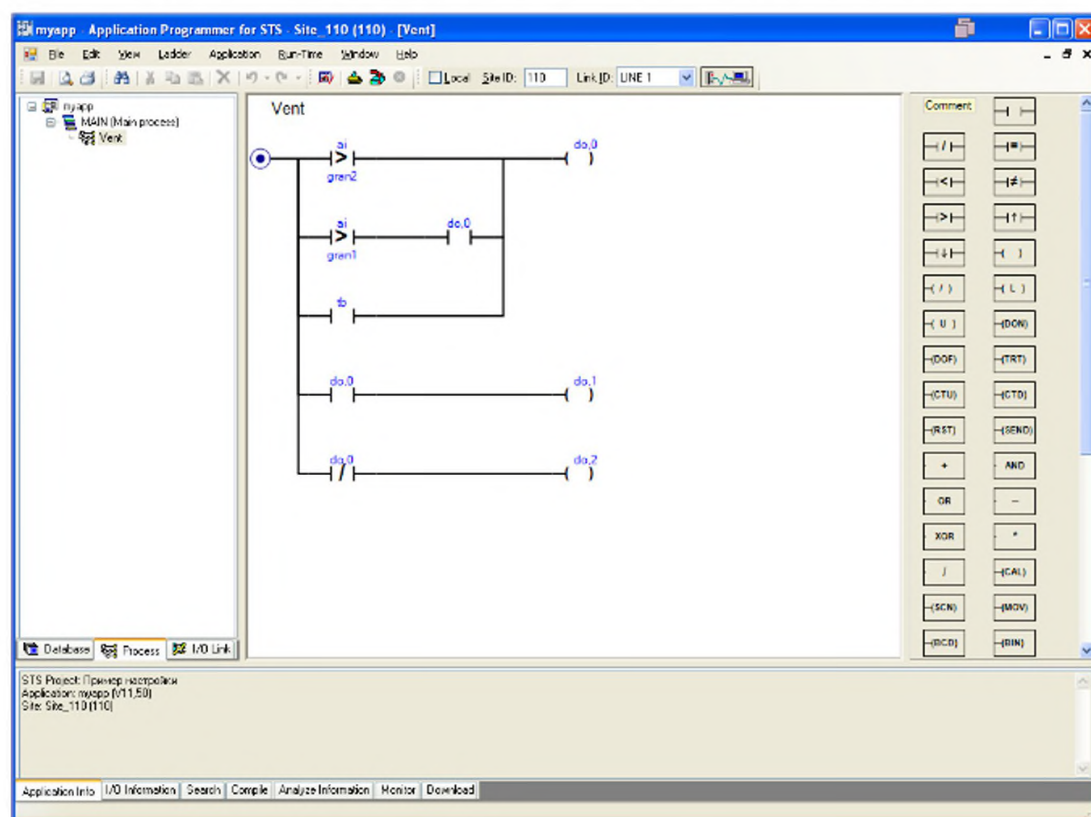


Рис. 6.25. Окно утилиты Application Programmer
ПЛК ACE3600

6.6. Примеры решаемых программируемыми логическими контроллерами задач и их решение

6.6.1. Задача автоматизированного управления накопительным баком

Постановка задачи. Необходимо осуществить автоматизированное управление накопительным баком для воды. Вода закачивается в бак с помощью насоса, который подключен к дискретному выходу ПЛК № 8, включение выхода 8 соответствует включению насоса. Пуск насоса производится нажатием кнопки, подключенной к дискретному входу ПЛК № 1. Останов насоса производится нажатием кнопки, подключенной ко входу № 2. В баке установлены датчики уровня воды и датчик, сигнализирующий об отсутствии воды. Датчик отсутствия воды подключен к дискретному входу № 5, состояние «включено» этого датчика говорит об отсутствии воды. Датчики уровня расположены следующим образом: датчик достижения водой середины бака подключен ко входу № 6, состояние «включено» этого и остальных датчиков уровня говорит о достижении водой датчика. Датчик достижения максимального уровня подключен ко входу № 7. Есть также датчик критического уровня воды, он подключен ко входу № 8. Установлены сигнальные лампы для отображения уровня воды, они подключены к дискретным выходам. К выходу № 2 подключена лампа, сигнализирующая об отсутствии воды, к выходу № 3 — лампа среднего уровня воды, к № 4 — максимального уровня воды. К выходу № 5 подключена лампа аварийного останова насоса. Аварийный останов насоса производится, если сработал датчик критического уровня воды или одновременно сработали датчик отсутствия воды и какой-либо из датчиков уровня. Необходимо составить программу для ПЛК, реализующую управление насосом и сигнальными лампами.

Анализ задачи. Допустим, задача решается с помощью ПЛК Direct Logic серии DL205. У данного ПЛК входы и выходы нумеруются, начиная с нуля, в восьмеричной системе исчисления. Дискретные входы обозначаются X , выходы — Y . Составим таблицу соответствия сигналов (табл. 6.1).

Поскольку мы работаем с жидкостью, то следует ожидать некоторых волновых процессов внутри бака. В связи с этим необходимо ввести некоторую «инерционность» для сигнальных ламп, отвечающих за сигнализацию об уровне жидкости. В противном случае возможны эффекты мерцания ламп из-за ряби на поверхности жидкости при достижении водой уровня, близкого к датчику. Для организации «инерционности» можно использовать таймеры. В данном примере установим задержку для таймеров 0,5 с. Необходимая в каждом конкретном случае задержка может быть подобрана в ходе испытаний

полученной программы на реальном объекте. При наличии более детального описания процессов, происходящих на объекте управления, можно изначально подобрать задержки более точно.

Таблица 6.1

**Соответствие логических имен переменных входов/выходов ПЛК DL205
с подключенным оборудованием**

Входы:	
X0	Кнопка пуска насоса
X1	Кнопка останова насоса
X4	Датчик отсутствия воды
X5	Датчик достижения водой середины бака
X6	Датчик достижения водой максимального уровня
X7	Датчик достижения водой критического уровня
Выходы:	
Y2	Лампа сигнализации об отсутствии воды
Y3	Лампа сигнализации достижения водой середины бака
Y4	Лампа сигнализации достижения водой максимального уровня
Y5	Лампа сигнализации об аварийном останове насоса
Y7	Управление насосом

Также проанализировав условие, можно выделить еще один случай аварийной ситуации — срабатывание датчика максимального уровня воды, без срабатывания датчика достижения водой середины бака.

Решение задачи. Часть программы, реализующая управление насосом, аварийный останов и управление сигнальной лампой отсутствия воды, приведена на рис. 6.26.

Управление остальными сигнальными лампами осуществляется аналогично, эта часть программы представлена на рис. 6.27.

Рассмотрим приведенную на рис. 6.26 программу построочно.

Первая строка, условием «нормально открытый контакт» проверяется первый вход X0 на состояние «включен»: если он включен, командой SET включается выход Y7, управляющий насосом. После включения командой SET Y7 останется включенным до тех пор, пока его не выключит какая-либо другая команда.

Вторая строка: аналогично при включении входа X1, командой RST выключается выход Y7. После команды RST выход Y7 останется выключенным до тех пор, пока его не включит какая-либо другая команда.

Третья строка: здесь проверяются все условия на аварийный останов насоса, и в случае выполнения любого из них выключается выход Y7. Параллельные соединения в языке LD фактически обозна-

чают объединение логических условий по ИЛИ, последовательные — по И. Для аварийного останова насоса есть несколько условий:

- если сработал датчик критического уровня воды (включен X7);
- если одновременно сработал датчик отсутствия воды (включен X4) и какой-либо из датчиков уровня (включен X5 или X6);
- если сработал датчик верхнего уровня (включен X6) и не сработал датчик среднего уровня (выключен X5);

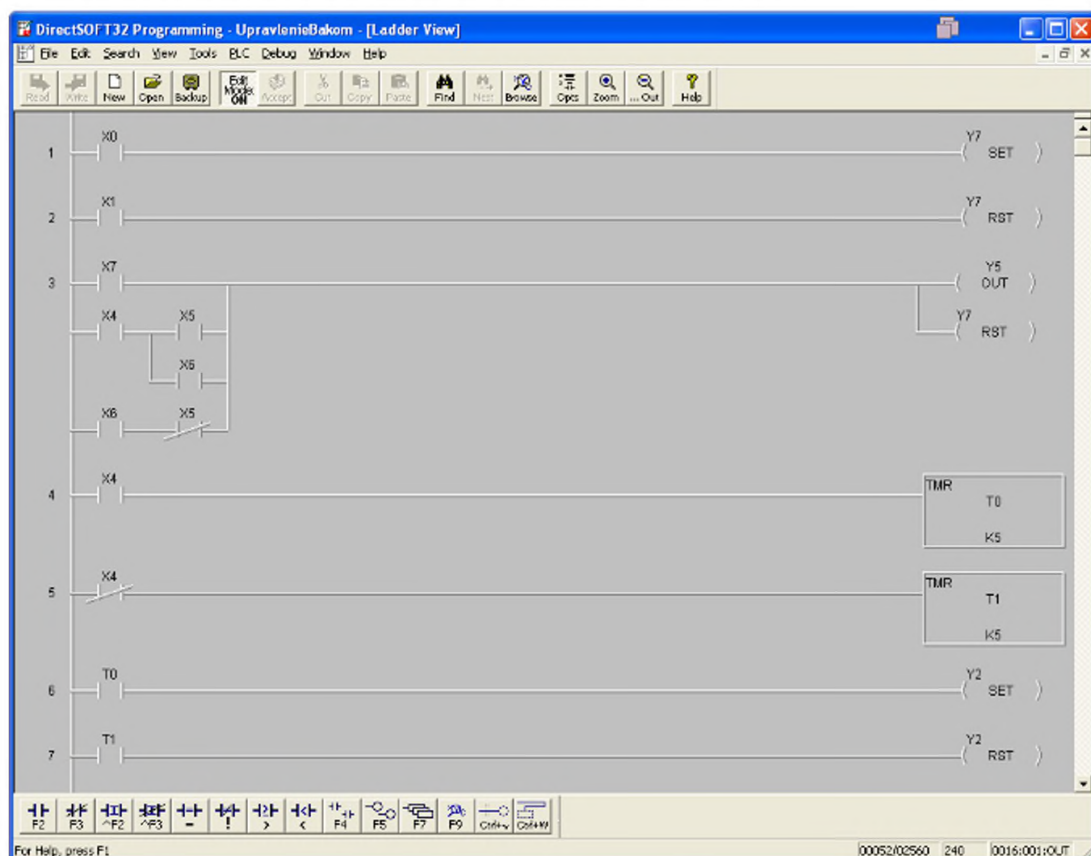


Рис. 6.26. Часть программы, управляющая насосом, аварийным останомом и лампой отсутствия воды

Эти три условия можно свести в одно, в итоге получится логическое условие $X7 \text{ or } X4 \text{ and } (X5 \text{ or } X6) \text{ or } X6 \text{ and } \overline{X5}$, которое и реализовано в данной строке. При выполнении этого условия командой OUT включается Y5 (лампа аварийного останова) и выключается Y7. Команда OUT будет поддерживать вход Y5 включенным, только пока выполняется стоящее до нее условие. Если условие перестанет выполняться, эта команда выключит выход Y5.

Здесь следует напомнить, что программа в ПЛК выполняется циклически, т. е. при достижении конца программы через небольшой промежуток времени программа будет снова выполнена (см. п. 6.4). Кроме того, программа выполняется построчно, начиная с первой строки. Таким образом, поскольку вторая и третья строки выполняются после первой, проверка условий выключения насоса и его

выключение будет выполнено после строки, его включающей. Установка значений переменных выходов на реальные точки выходов осуществляется после полного выполнения управляющей программы (см. п. 6.4, рис. 6.9), поэтому при возникновении аварийных условий, при нажатой кнопке пуска, насос останется выключенным. Аналогично при одновременном нажатии кнопок пуска и останова насоса насос останется выключенным.

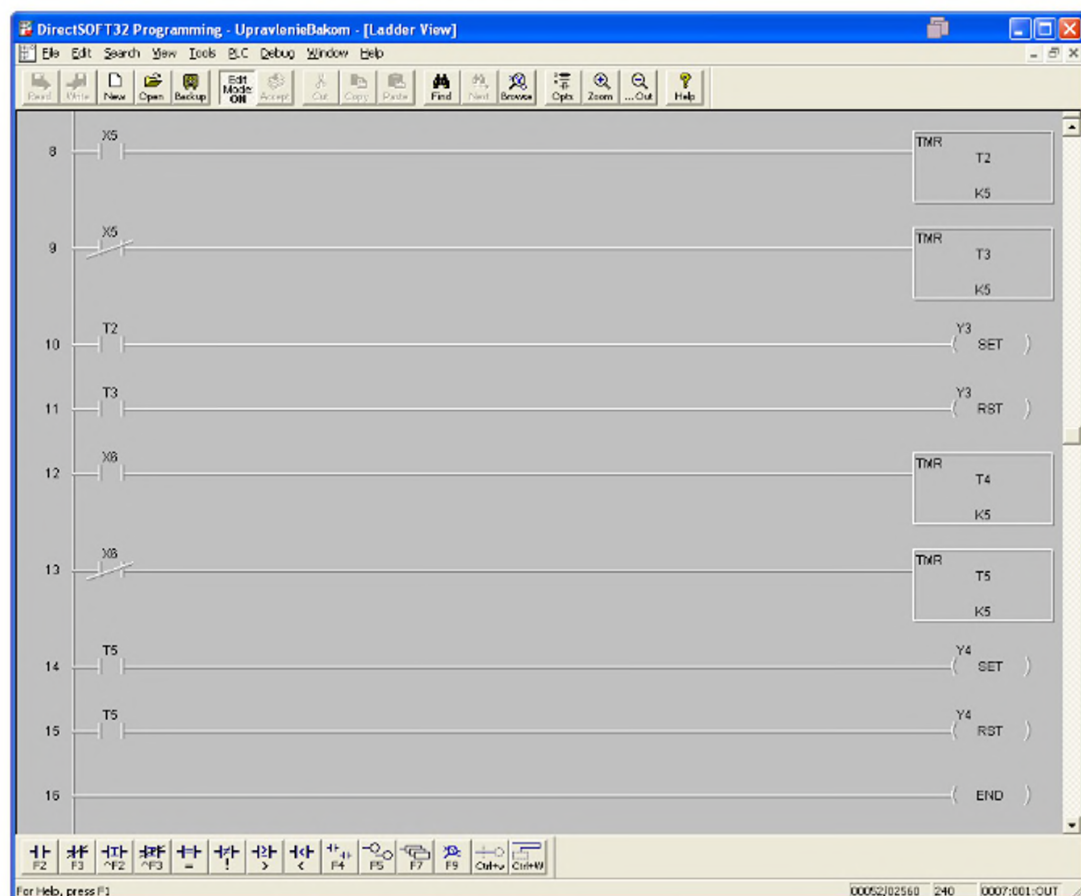


Рис. 6.27. Часть программы, управляющая лампами уровня воды

Четвертая строка: по включении X4 запускается таймер T0 с уставкой, равной пяти счетам. Этот таймер имеет дескреу счета 0,1 с. Таким образом, уставка таймера будет 0,5 с. После того как таймер отсчитает указанный интервал времени, будет взведен его одноименный флаг статуса T0 в состояние «включено». При пропадании разрешающего счет сигнала, т. е. если условие стоящее перед таймером перестает выполняться, данный тип таймеров сбрасывается в начальное состояние и устанавливает свой флаг статуса в состояние «выключено».

Пятая строка: аналогично четвертой, но теперь по выключении X4 запускается таймер T1, тоже на 0,5 с.

Шестая строка: если таймер T0 отсчитал 0,5 с, то включается выход Y2 (лампа сигнализации об отсутствии воды).

Седьмая строка: если таймер T1 отсчитал 0,5 с, то выход Y2 выключается.

Эти четыре строки реализуют фильтрацию мелких волн воды при достижении уровня воды датчика. Лампы не включаются, пока не будет устойчивого срабатывания датчика в течение 0,5 с, и не выключаются, пока не будет устойчивого выключения датчика на такой же интервал времени. Остальные сигнальные лампы уровня воды управляются аналогично (см. рис. 6.27).

Таким образом, поставленная задача решена.

6.6.2. Управление трехцветными светофорами

Постановка задачи: организовать управление трехцветными светофорами на перекрестке двух дорог.

Входные сигналы ПЛК, используются дискретные входы:

- Вход № 1 — тумблер включения светофоров;
- Вход № 2 — кнопка «Отдать приоритет дороге 1»;
- Вход № 3 — кнопка «Отдать приоритет дороге 2»;
- Вход № 4 — кнопка «Отдать равные приоритеты дорогам»;
- Вход № 5 — датчик включения зеленого сигнала на дороге 1 (состояние включено говорит о том, что сигнал зажегся);
- Вход № 6 — датчик включения красного сигнала на дороге 1;
- Вход № 7 — датчик включения зеленого сигнала на дороге 2;
- Вход № 8 — датчик включения красного сигнала на дороге 2.

Выходные сигналы, используются дискретные выходы:

- Выход № 1 — включение зеленого сигнала на дороге 1;
- Выход № 2 — включение желтого сигнала на дороге 1;
- Выход № 3 — включение красного сигнала на дороге 1;
- Выход № 4 — включение зеленого сигнала на дороге 2;
- Выход № 5 — включение желтого сигнала на дороге 2;
- Выход № 6 — включение красного сигнала на дороге 2;
- Выход № 7 — сигнал о неисправности.

Светофор должен управляться согласно следующим правилам (все интервалы времени уменьшены по сравнению с реальными для более быстрой отладки приложения, также пропущен этап мигания зеленого сигнала перед переходом на желтый):

1) работа светофоров осуществляется при только включенном «тумблере включения светофоров», если он выключен, светофоры должны быть выключены;

2) переключение сигналов от зеленого к красному осуществляется с участием желтого сигнала, желтый должен гореть 2 с. Переключение от красного к зеленому происходит напрямую;

3) пока горит зеленый или желтый сигнал для одной из дорог, для другой должен гореть красный;

4) для случая с равными приоритетами зеленый свет для обеих дорог поджигается на 10 с;

5) в случае приоритета дороги 1 для нее зеленый сигнал должен гореть 15 с, а для дороги 2 — всего 5 с;

6) аналогично в случае приоритета дороги 2, для нее зеленый сигнал должен гореть 15 с, а для дороги 1 — всего 5 с;

7) при включении красных и зеленых сигналов на обеих дорогах необходимо проверять исполнение их светофорами по соответствующим датчикам включения. Если исполнения любого из четырех сигналов не происходит, светофоры необходимо перевести в режим нерегулируемого перекрестка;

8) в режиме нерегулируемого перекрестка все светофоры должны мигать желтым сигналом с периодом 0,5 с (0,25 с «включено» и 0,25 с «выключено»). Кроме того, должен быть включен сигнал о неисправности. Выход из данного режима происходит при выключении «тумблера включения светофоров».

Анализ задачи. Сложные задачи обычно решаются разбиением на простые части или так называемые стадии состояния объекта. Данную задачу можно решить и без этого, но для примера проведем такое разбиение.

В данном случае можно выделить три состояния светофора:

- 1) ожидание пуска;
- 2) нормальный режим работы;
- 3) режим нерегулируемого перекрестка.

В нормальном режиме работы также можно выделить три разных режима, для каждого из приоритетов. Но в данном случае это создаст лишние сложности, и текст программы этих режимов почти совпадет, кроме интервалов уставок таймеров. Поэтому трех выше описанных состояний будет достаточно.

Далее необходимо продумать условия перехода между состояниями. В данном случае получаются четыре перехода:

- 1) из ожидания пуска в нормальный режим работы по включению входа 1;
- 2) из нормального режима работы в ожидание пуска по выключению входа 1;
- 3) из нормального режима работы в режим нерегулируемого перекрестка при несрабатывании кого-либо датчика обратной связи;
- 4) из режима нерегулируемого перекрестка в ожидание пуска по выключению входа 1.

Все условия довольно просты, кроме третьего, рассмотрим его более подробно. По сути оно означает, что необходимо при подаче команды на включение какого-либо из зеленых и красных сигналов через небольшой промежуток времени проверить включение соответствующего этому сигналу датчика. Для простоты отладки примем этот промежуток времени равным 1 с. Результат можно представить в виде графической схемы переходов (рис. 6.28).



Рис. 6.28. Графическая схема переходов между состояниями светофоров

Теперь необходимо составить таблицу соответствия сигналов входам ПЛК. В качестве примера реализации снова рассмотрим ПЛК DL205, с модулем ЦПУ DL240 (табл. 6.2).

Осталось определиться с режимом работы светофоров по умолчанию, поскольку в условии он не указан. Допустим это будет режим равных приоритетов.

Таблица 6.2

Соответствие логических имен переменных входов/выходов ПЛК DL205 с подключенным оборудованием

Входы:	
X0	Тумблер включения светофоров
X1	Кнопка отдать приоритет дороге 1
X2	Кнопка отдать приоритет дороге 2
X3	Кнопка отдать равные приоритеты дорогам
X4	Датчик включения зеленого сигнала на дороге 1
X5	Датчик включения красного сигнала на дороге 1
X6	Датчик включения зеленого сигнала на дороге 2
X7	Датчик включения красного сигнала на дороге 2
Выходы:	
Y0	Включение зеленого сигнала на дороге 1
Y1	Включение желтого сигнала на дороге 1
Y2	Включение красного сигнала на дороге 1
Y3	Включение зеленого сигнала на дороге 2
Y4	Включение желтого сигнала на дороге 2
Y5	Включение красного сигнала на дороге 2
Y6	Сигнал о неисправности

Решение задачи. Часть программы, отвечающая за переключение режимов работы светофоров, приведена на рис. 6.29. Также на этом рисунке показана первая стадия — ожидания пуска.

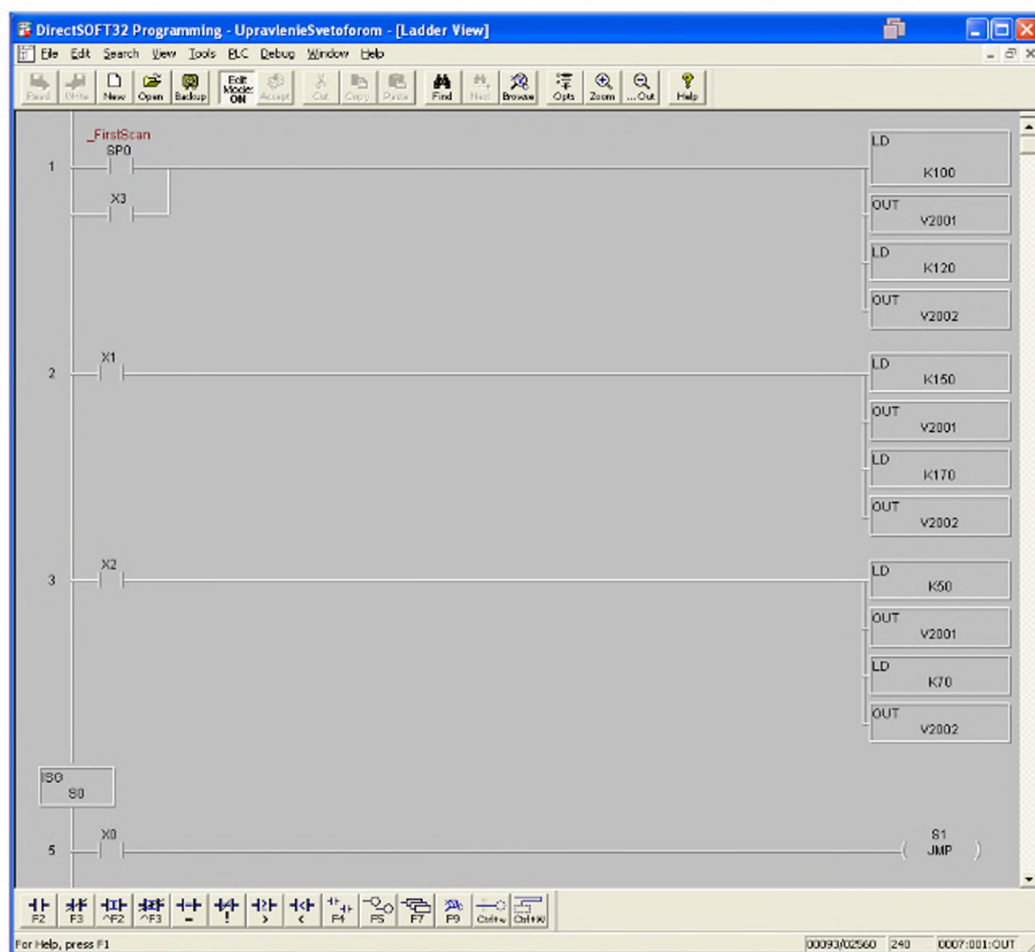


Рис. 6.29. Переключение режимов работы светофоров и стадия пуска

Разберем эту часть программы более подробно. Для изменения интервалов времени работы сигналов светофора в память ПЛК записываются пороги сравнения. Для измерения длительности включения сигналов будет использоваться таймер TMR, у которого дискрета счета — 0,1 с. Поэтому все интервалы времени домножаются на 10, т. е. для 5 с в память ПЛК пишется 50, для 10 — 100 и для 15 — 150. В память так же записывается еще одна величина — нужный интервал времени, увеличенный на 2 с, это необходимо для организации работы желтого света, этот интервал также домножается на 10. Для записи числа в ячейку памяти в ПЛК DL205 нужно применять две последовательные команды LD и OUT в прямоугольной рамке. LD загружает указанное в ней число в регистр процессора ПЛК, который называется аккумулятором. Команда OUT в прямоугольной рамке выводит числа, лежащие в аккумуляторе, по указанному в команде адресу памяти. SP0 — это внутренний флаг ПЛК, состояние «включено» говорит о том, что программа проходит первый

цикл после включения ПЛК либо после записи в ПЛК новой программы. В остальных случаях этот флаг выключен.

Строка № 1 — при прохождении первого цикла либо при нажатии на кнопку «отдать равные приоритеты» в память загружаются числа, соответствующие интервалам 10 и 12 с.

Строка № 2 — при нажатии на кнопку «отдать приоритет дороге 1» в память загружаются числа, соответствующие интервалам 5 и 7 с.

Строка № 3 — при прохождении первого цикла либо при нажатии на кнопку «отдать приоритет дороге 2» в память загружаются числа, соответствующие интервалам 15 и 17 с.

Строка № 4 — указатель стадии S0 «Ожидание пуска», данная стадия является начальной (ISG), т. е. после запуска ПЛК либо после записи в ПЛК новой программы она будет активной. Программируемый логический контроллер исполняет только активные стадии, команды в неактивных стадиях пропускаются.

Строка № 5 — проверка на включение «тумблера включения светофоров». Если он включен, то осуществляется переход на стадию S1, нормальный режим работы. Переход JMP активирует указанную в нем стадию и деактивирует текущую.

Часть программы, отвечающая за переключение сигналов светофоров, приведена на рис. 6.30. Она основана на одном таймере TMR, текущее значение счетов которого сравнивается с порогами переключения сигналов. Общее время цикла работы светофоров равно 24 с, это значение указано как уставка для таймера. При достижении уставки таймер сбрасывается, что и обеспечивает цикличность работы светофоров.

Разберем эту часть программы более подробно.

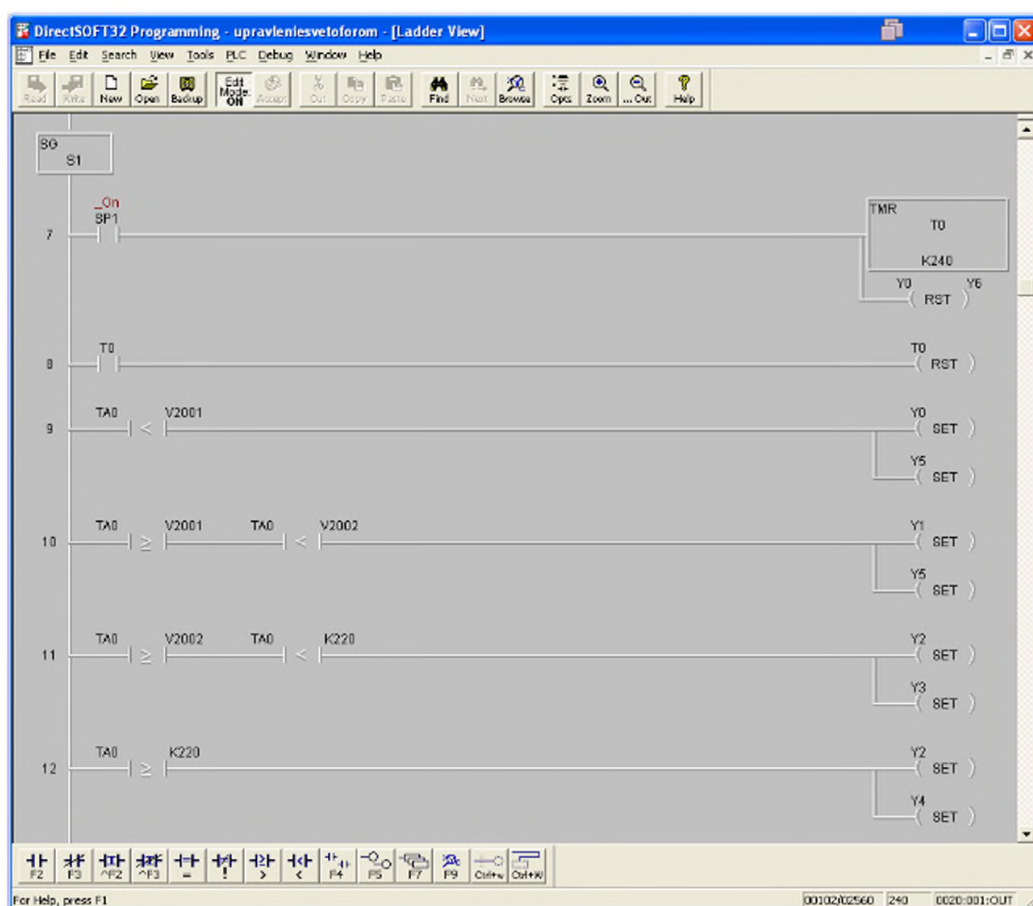
Строка № 6 — указатель стадии S1 «Нормальный режим работы».

Строка № 7 — запускается таймер T0 с уставкой 24 с (20 с на работу зеленого и красного сигналов на дорогах и еще 2 + 2 с на работу желтого сигнала). Флаг SP1 всегда включен, т. е. таймер всегда будет активен, когда активна стадия S1. Данный ПЛК не позволяет использовать действия без условий внутри текста программы, поэтому приходится использовать флаг SP1. Также предварительно все сигналы светофора с Y0 по Y6 устанавливаются в состояние «выключено».

Строка № 8 — при достижении таймером T0 уставки производится его сброс.

Строка № 9 — текущее количество счетов таймера сравнивается с первым порогом, если меньше него, включается зеленый сигнал для дороги 1 (Y0) и красный сигнал для дороги 2 (Y5).

Строка № 10 — текущее количество счетов таймера проверяется на вхождение в интервал от первого до второго порога, если оно входит в интервал, включается желтый сигнал для дороги 1 (Y1) и красный сигнал для дороги 2 (Y5).



**Рис. 6.30. Начало стадии «Нормальный режим работы»,
управление сигналами светофоров**

Строка № 11 — текущее количество счетов таймера проверяется на вхождение в интервал от второго порога до 22 с, если оно входит в интервал, включается красный сигнал для дороги 1 (Y2) и зеленый сигнал для дороги 2 (Y3).

Строка № 12 — если текущее количество счетов таймера больше 220 (22 с), то включается красный сигнал для дороги 1 (Y2) и желтый сигнал для дороги 2 (Y4).

Следующая часть программы (рис. 6.31) обеспечивает обработку сигналов обратной связи от датчиков включения сигналов светофора.

Строки № 13—16 — при выдаче команды на включение красных и зеленых сигналов на дорогах запускается соответствующий этому сигналу таймер с уставкой в 1 с.

Строка № 17 — проверяется статус каждого из таймеров и включение соответствующего датчика обратной связи. Если какой-либо таймер досчитал до уставки и при этом с соответствующего датчика нет сигнала о включении нужного света светофоров, происходит переход на стадию S2 «Режим нерегулируемого перекрестка».

Строка № 18 — при выключении тумблера включения светофоров осуществляется переход на стадию S0 «Ожидание пуска», все сигналы светофора сбрасываются.

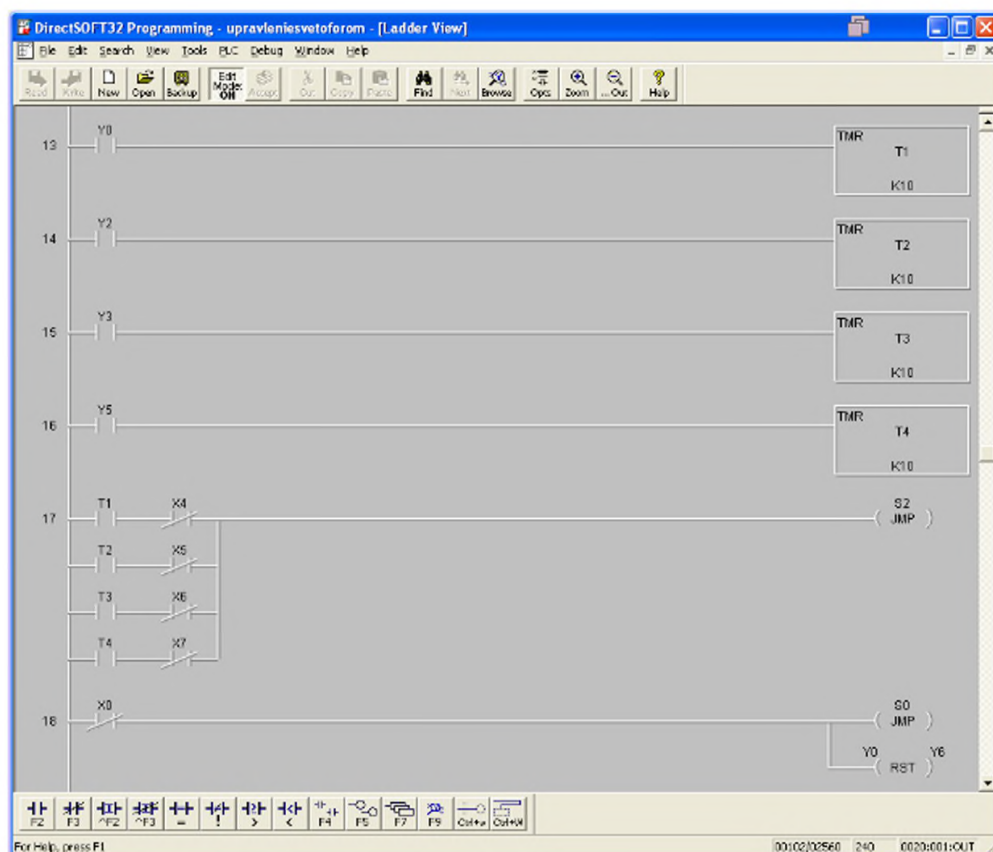


Рис. 6.31. Конец стадии «Нормальный режим работы», обработка сигналов от датчиков

Код стадии «Режим нерегулируемого перекрестка» приведен на рис. 6.32.

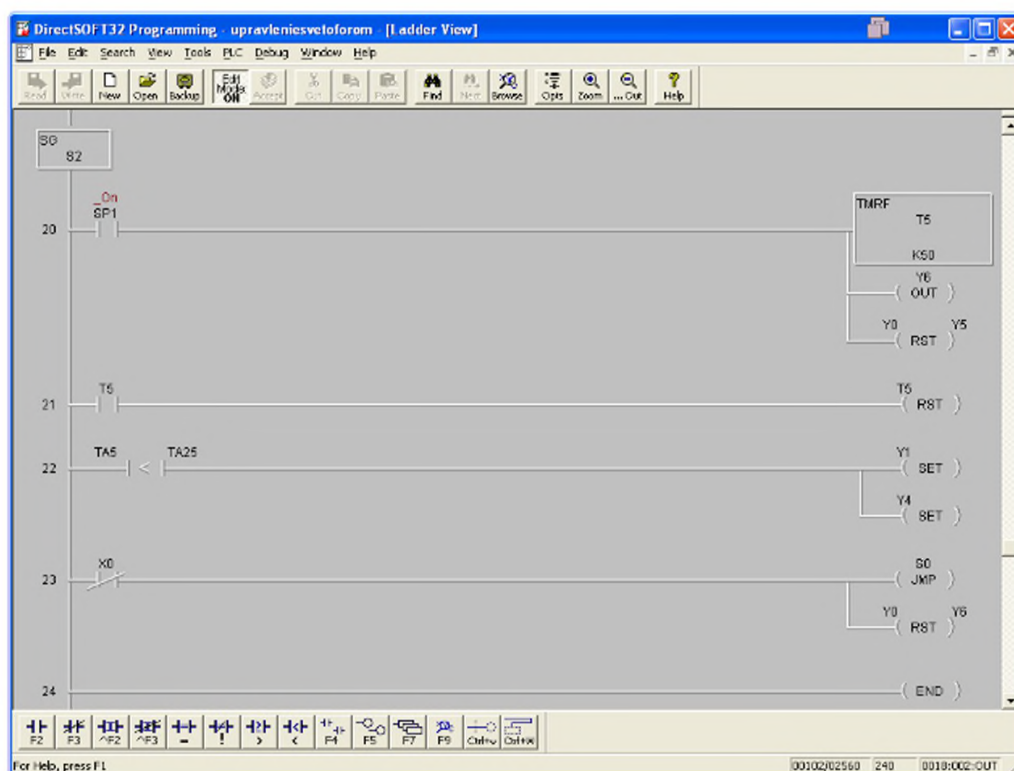


Рис. 6.32. Стадия «Режим нерегулируемого перекрестка»

Строка № 19 — указатель стадии S2 «Режим нерегулируемого перекрестка».

Строка № 20 — запускается таймер TMR5 T5 с уставкой 5 с. Используется таймер с дискретой счета 0,01 с, поскольку нам нужно отмерять интервалы времени длиной в 0,25 с. Также здесь включается «сигнал о неисправности» Y6 и предварительно сбрасываются остальные сигналы светофора.

Строка № 21 — при достижении таймером T5 уставки производится его сброс.

Строка № 22 — если количество счетов таймера T5 меньше 25 (0,25 с), включаются желтые сигналы на обеих дорогах.

Строка № 23 — при выключении тумблера включения светофоров осуществляется переход на стадию S0 «Ожидание пуска», все сигналы светофора сбрасываются.

Рекомендуемая литература

Для тем 1, 3, 4

1. Булгаков, А. Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление / А. Г. Булгаков. — Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2007.
2. Волков, И. Н. Электромашинные устройства автоматики / И. Н. Волков, В. Н. Миловзоров. — Москва : Высшая школа, 1978.
3. Зенкевич, С. Л. Основы управления манипуляционными роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. — 2-е изд. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.
4. Кацман, М. М. Электрические машины / М. М. Кацман. — Москва : Высшая школа, 2001.
5. Кацман, М. М. Электрические машины автоматических систем / М. М. Кацман, Ф. М. Юферов. — Москва : Высшая школа, 1979.
6. Келим, Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления / Ю. М. Келим. — Москва : Форум-Пресс, 2002.
7. Ким, Д. П. Теория автоматического управления : учебник и практикум для вузов / Д. П. Ким. — Москва : Издательство Юрайт, 2024.
8. Кремлев, А. С. Моделирование и программирование робототехнических комплексов / А. С. Кремлев, К. А. Зименко, А. С. Боргуль. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013.
9. Лукинов, А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств / А. П. Лукинов. — Санкт-Петербург : Лань, 2012.
10. Мирошник, И. В. Теория автоматического управления: Нелинейные и оптимальные системы : учебное пособие для вузов / И. В. Мирошник. — Санкт-Петербург : Питер, 2006.
11. Мобильные роботы. Робот-колесо и робот-шар / под редакцией А. В. Борисова, И. С. Мамаева, Ю. А. Караваева. — Москва : ИКИ, 2013.
12. Ощепков, А. Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB / А. Ю. Ощепков. — Санкт-Петербург : Лань, 2013.
13. Подлипенский, В. С. Элементы и устройства автоматики / В. С. Подлипенский, Ю. А. Сабинин, Л. Ю. Юрчук. — Санкт-Петербург : Политехника, 1995.
14. Предко, М. Устройства управления роботами / М. Предко. — Москва : ДМК Пресс, 2010.
15. Романова, И. К. Управление сложными техническими объектами. Часть 3. Построение математических моделей систем / И. К. Романова. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010.

16. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. — Москва : МЭИ, 2008.
17. Сабинин, Ю. А. Электромашинные устройства автоматики / Ю. А. Сабинин. — Москва : Энергоатомиздат, 1988.
18. Сидоров, И. Н. Малогабаритные трансформаторы и дроссели : справочник / И. Н. Сидоров, В. В. Мукосеев, А. А. Христинин. — Москва : Радио и связь, 1985.
19. Техническая кибернетика. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Книга 1. Измерительные устройства, преобразовательные элементы и устройства / под редакцией В. В. Солодовникова. — Москва : Машиностроение, 1973.
20. Техническая кибернетика. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Книга 2. Усилительные устройства, корректирующие элементы и устройства / под редакцией В. В. Солодовникова. — Москва : Машиностроение, 1975.
21. Техническая кибернетика. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Книга 3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы / под редакцией В. В. Солодовникова. — Москва : Машиностроение, 1976.
22. Транзисторы : справочник / О. П. Григорьев [и др.]. — Москва : Радио и связь, 1989.
23. Усольцев, А. А. Электрические машины автоматических устройств / А. А. Усольцев. — Санкт-Петербург : ЛИТМО, 2011.
24. Филаретов, В. Ф. Устройства и системы управления подводных роботов / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец. — Москва : Наука, 2005.
25. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005.

Для темы 2

1. Богданов, С. В. Умный дом / С. В. Богданов. — Москва : Наука и техника, 2005.
2. Гольцман, Ф. М. Вопросы статистической обработки измерений / Ф. М. Гольцман. — Санкт-Петербург, 2000.
3. Ефимчик, М. К. Технические средства электронных систем. Вводный курс / М. К. Ефимчик. — Минск : Тесей, 2000.
4. Клаассен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы измерительной техники / К. Б. Клаассен. — Москва, 2002.
5. Крылова, Г. Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии / Г. Д. Крылова. — Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2000.
6. Метрология и радиоизмерения / под редакцией В. М. Нефедова. — Москва : Высшая школа, 2003.
7. Назаров, Н. Г. Метрология: основные понятия и математические модели / Н. Г. Назаров. — Москва : Высшая школа, 2002.

8. Тартаковский, Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерения : учебник для вузов / Д. Ф. Тартаковский. — Москва : Высшая школа, 2001.

9. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. — Москва : Техносфера, 2006.

Для тем 1, 5, 6

1. Анашкин, А. С. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления : учебное пособие по специальности 210100 «Управление и информатика в технических системах» / А. С. Анашкин, Э. Д. Кадыров, В. Г. Харазов. — Санкт-Петербург : П-2, 2005.

2. Белов, М. П. Технические средства автоматизации и управления / М. П. Белов. — Санкт-Петербург : СЗТУ, 2006.

3. Вегнер, В. А. Аппаратура персональных компьютеров и ее программирование / В. А. Вегнер [и др.]. — Москва : Радио и связь, 1995.

4. Виноградова, Н. А. Автоматизированные системы на основе интерфейса КАМАК. Лабораторные работы / Н. А. Виноградова, А. А. Есюткин. — Москва : МЭИ, 2006.

5. Виноградова, Н. А. Автоматизированные системы научных исследований. Техническое обеспечение / Н. А. Виноградова, А. А. Есюткин, Г. Ф. Филаретов. — Москва : МЭИ, 1990.

6. Виноградова, Н. А. Проектирование автоматизированных систем научных исследований / Н. А. Виноградова, А. А. Есюткин, Г. Ф. Филаретов. — Москва : МЭИ, 1987.

7. Втюрин, В. А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП : учебное пособие / В. А. Втюрин. — Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2007.

8. Гусев, Н. В. Автоматизация технологических комплексов и систем в промышленности / Н. В. Гусев, С. В. Ляпушкин, М. В. Коваленко. — Томск : Томский политехнический университет, 2011.

9. Есюткин, А. А. Обмен данными между ЭВМ и внешними устройствами в режиме прямого доступа к памяти. Лабораторная работа по курсу «ПАСА» / А. А. Есюткин. — Москва : МЭИ, 1998.

10. Есюткин, А. А. Технические средства программного управления объектами автоматизации. Сборник лабораторных работ : методическое пособие / А. А. Есюткин. — Москва : МЭИ, 2010.

11. Пантелеев, В. Н. Основы автоматизации производства / В. Н. Пантелеев, В. М. Прошин. — Москва : Академия, 2011.

12. Петров, И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И. В. Петров. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2004.

13. Приборно-модульные автоматизированные измерительные системы : справочник / под редакцией В. А. Кузнецова. — Москва : Радио и связь, 1993.

14. *Рождественский, Д. А.* Автоматизированные комплексы распределенного управления : учебно-методическое пособие / Д. А. Рождественский. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007.

15. *Романов, В. Н.* Системный анализ для инженеров / В. Н. Романов. — Санкт-Петербург : СЗГЗТУ, 2006.

16. *Советов, Б. Я.* Теоретические основы автоматизированного управления : учебник / Б. Я. Советов, В. П. Цехановский, В. Д. Чертовский. — Москва : Высшая школа, 2006.

17. *Схиртладзе, А. Г.* Технологические процессы автоматизированного производства / А. Г. Схиртладзе, А. В. Скворцов. — Москва : Академия, 2014.

18. *Тарасенко, Ф. П.* Прикладной системный анализ / Ф. П. Тарасенко. — Москва : КноРус, 2011.

19. *Финогенов, К. Г.* Программирование измерительных систем реального времени / К. Г. Финогенов. — Москва : Энергоатомиздат, 1990.

20. *Харазов, В. Г.* Интегрированные системы управления технологическими процессами / В. Г. Харазов. — Санкт-Петербург : Профессия, 2009.

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Учебник для СПО

Под общей редакцией О. С. Колосова

Формат 70×100¹/₁₆.
Гарнитура «Charter». Печать цифровая.
Усл. печ. л. 25,68.

ООО «Издательство Юрайт»
111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru