

**А. В. Шагин, В. И. Демкин, В. Ю. Кононов,
А. Б. Кабанова**

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СПО

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

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2017

УДК 658.012.011.56:658.512

ББК 32.965я73

Щ16



Настоящая методическая разработка выполнена в рамках инновационной образовательной программы МИЭТ «Современное профессиональное образование для российской инновационной системы в области электроники»

Рецензент:

Одиноков В. В. — доктор технических наук, профессор.

Щагин, А. В.

Щ16 Основы автоматизации технологических процессов : учеб. пособие для академического бакалавриата / А. В. Щагин, В. И. Демкин, В. Ю. Кононов, А. Б. Кабанова. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 163 с. — Серия : Профессиональное образование.

ISBN 978-5-534-03848-4

Учебное пособие посвящено рассмотрению вопросов автоматизации технологических процессов производства изделий микроэлектроники. Авторы сочли целесообразным отразить такие вопросы, как основные технологические процессы обрабатывающей фазы производства изделий микроэлектроники для получения интегральных структур, систем автоматизации техпроцессов, технических средств автоматизации и управления, контроллеров и программно-технических комплексов отечественных и зарубежных производителей, используемых в системах управления техпроцессами, систем диспетчерского управления и сбора данных.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, может быть полезно также научным работникам и инженерам.

УДК 658.012.011.56:658.512

ББК 32.965я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Щагин А. В., Демкин В. И.,
Кононов В. Ю., Кабанова А. Б., 2009
© ООО «Издательство Юрайт», 2017

ISBN 978-5-534-03848-4

Оглавление

| | |
|--|-----------|
| Введение..... | 7 |
| Глава 1. Управление технологическими процессами в микроэлектронике | 9 |
| 1.1. Основные технологические процессы производства изделий микроэлектроники | 9 |
| 1.2. Основные характеристики оборудования автоматизированного производства микроэлектроники .. | 16 |
| 1.2.1. Обработка поверхности пластин..... | 16 |
| 1.2.2. Литография | 20 |
| 1.2.3. Физико-термические процессы | 26 |
| 1.2.4. Нанесение слоев | 27 |
| 1.3. Подсистемы технологического оборудования | 31 |
| Глава 2. Системы автоматизации технологических процессов | 36 |
| 2.1. Основные понятия и определения | 37 |
| 2.2. Регуляторы уровня жидкости и центробежный регулятор скорости вращения..... | 41 |
| 2.3. Функциональная схема систем автоматического управления | 43 |
| 2.4. Классификация систем автоматического управления | 43 |
| 2.5. Основные принципы управления..... | 47 |
| 2.5.1. Принцип управления по возмущению..... | 47 |
| 2.5.2. Принцип управления по отклонению | 51 |
| 2.5.3. Комбинированный принцип управления..... | 56 |
| Глава 3. Средства автоматизации и управления | 59 |
| 3.1. Измерение технологических параметров..... | 59 |

| | |
|---|----|
| 3.2. Основные определения..... | 62 |
| 3.3. Классификация контрольно-измерительных приборов..... | 64 |
| 3.4. Виды первичных преобразователей..... | 65 |
| 3.5. Методы и приборы для измерения температуры | 65 |
| 3.5.1. Термометры расширения (жидкостные стеклянные)..... | 66 |
| 3.5.2. Термометры, основанные на расширении твердых тел | 66 |
| 3.5.3. Газовые и жидкостные манометрические термометры..... | 67 |
| 3.5.4. Конденсационные манометрические термометры | 68 |
| 3.5.5. Электрические термометры | 68 |
| 3.5.6. Термометры сопротивления..... | 70 |
| 3.5.7. Пирометры излучения | 71 |
| 3.5.8. Цветовые пирометры..... | 71 |
| 3.6. Вторичные приборы для измерения разности потенциалов | 72 |
| 3.6.1. Пирометрические милливольтметры..... | 72 |
| 3.6.2. Потенциометры..... | 73 |
| 3.6.3. Автоматические электрические потенциометры... | 73 |
| 3.7. Методы измерения сопротивления..... | 75 |
| 3.8. Методы и приборы для измерения давления и разряжения | 76 |
| 3.8.1. Жидкостные манометры..... | 77 |
| 3.8.2. Чашечные манометры и дифманометры | 78 |
| 3.8.3. Микроманометры..... | 79 |
| 3.8.4. Пружинные манометры | 79 |
| 3.9. Методы и приборы для измерения расхода пара, газа и жидкости | 80 |
| 3.9.1. Метод переменного перепада давления..... | 80 |
| 3.9.2. Расходомеры постоянного перепада давления | 82 |
| 3.9.3. Расходомеры переменного уровня..... | 83 |
| 3.9.4. Расходомеры скоростного напора..... | 83 |
| 3.10. Методы и приборы для измерения уровня..... | 84 |
| 3.10.1. Поплавковый метод измерения уровня..... | 84 |
| 3.10.2. Буйковые уровнемеры | 84 |
| 3.10.3. Гидростатические уровнемеры..... | 85 |
| 3.10.4. Электрические методы измерения уровня..... | 85 |
| 3.10.5. Радиоволновые уровнемеры..... | 86 |

Глава 4. Применение микропроцессорной техники в автоматизации технологических процессов87

| | |
|---|------------|
| 4.1. Комплекс технических средств многоуровневой системы управления | 94 |
| 4.2. Основные технические характеристики контроллеров и программно-технических комплексов | 97 |
| 4.2.1. Характеристика процессора | 98 |
| 4.2.2. Характеристика каналов ввода/вывода контроллеров | 101 |
| 4.2.3. Коммуникационные возможности контроллеров | 106 |
| 4.2.4. Эксплуатационные характеристики | 121 |
| 4.2.5. Программное обеспечение | 122 |
| 4.3. Новые технологии в производстве контроллеров | 126 |
| Глава 5. АСУТП и диспетчерское управление | 128 |
| 5.1. Общие понятия | 128 |
| 5.1.1. Определение и общая структура SCADA | 130 |
| 5.1.2. Функциональная структура SCADA | 131 |
| 5.1.3. Особенности SCADA как процесса управления | 132 |
| 5.2. Аппаратные и программные средства SCADA-систем | 133 |
| 5.2.1. Основные требования к SCADA-системам | 133 |
| 5.2.2. Основные возможности современных SCADA-пакетов | 134 |
| 5.2.3. Тенденции развития аппаратных и программных средств SCADA-систем | 134 |
| Общие тенденции | 134 |
| Удаленные терминалы | 135 |
| Каналы связи | 136 |
| Диспетчерские пункты управления | 137 |
| Операционные системы | 138 |
| Прикладное программное обеспечение | 138 |
| 5.3. SCADA-продукты на российском рынке | 139 |
| 5.3.1. Интегрированный пакет комплексной автоматизации <i>FactorySuite</i> | 140 |
| 5.3.2. SCADA-система <i>InTouch</i> | 141 |
| 5.3.3. SCADA-система <i>Citect</i> | 145 |
| 5.3.4. SCADA-системы <i>FIX</i> и <i>iFIX</i> | 150 |
| 5.3.5. SCADA-система <i>SIMATIC WinCC</i> | 153 |
| 5.3.6. SCADA-система <i>TRACE MODE</i> | 158 |
| Литература | 163 |

Введение

Решение задач ускорения научно-технического прогресса невозможно без использования микроэлектроники, обеспечивающей массовое освоение современной компьютерной техники и выпуск элементной базы для автоматизации машин и оборудования. Микроэлектроника решает проблему создания высоконадежной экономичной и миниатюрной радиоэлектронной аппаратуры, вычислительной техники и систем автоматизации при широком наборе выполняемых функций и большом объеме перерабатываемой информации.

Микроэлектроника является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей промышленности. Это подтверждается ежегодным удвоением степени интеграции микросхем и большой сменяемостью номенклатуры выпускаемых изделий. Перспективы развития микроэлектроники оцениваются возможностями технологии. Если принять за критерий размер элемента, который позволяют получить процессы литографии, то получается следующий ряд:

1980 г. — 1 мкм;

1990 г. — 0,7 мкм;

2000 г. — 0,25 мкм;

2010 г. — 0,01 мкм.

Переход в область сотых долей микрометра означает появление микросхем, использующих квантовые эффекты.

Для достижения этих показателей технологическое оборудование микроэлектроники должно базироваться на новейших достижениях многих направлений науки и техники, быть автоматизированным и работать, как правило, в составе робототехнических комплексов и гибких автоматизированных систем.

В настоящее время автоматизация технологических процессов микроэлектроники ведется на основе последних достижений микроэлектронной техники – микроконтроллеров.

Глава 1

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

1.1. Основные технологические процессы производства изделий микроэлектроники

Управление технологическими процессами в любой отрасли промышленности должно обеспечивать получение продукции с определенными свойствами. Решение этой задачи основывается на понимании взаимосвязи между *свойствами* изделия, *особенностями технологии* его изготовления и *характеристиками оборудования*, с помощью которого реализуется эта технология [1].

Производство интегральных микросхем (ИМС) представляет собой сложный многостадийный процесс, в котором можно выделить три фазы [7]:

- заготовительную, включающую в себя изготовление слитков, резку их на пластины, подготовку оснастки и инструмента, производство корпусов;
- обрабатывающую, предназначенную для получения интегральных структур в полупроводниковом материале или на его поверхности;
- сборочно-контрольную, завершающую изготовление ИМС. В нее входят операции: разделение пластин на кристаллы, сборка схем в корпус, герметизация, контроль качества изделий и испытания.

Основные характеристики ИМС, определяющие область их применения, создаются *обрабатывающей фазой*. Она предъявляет особо высокие требования к точности и стабильности технологических процессов и условиям их выполнения. Все это приводит к необходимости решения сложных задач управления и разработки совершенных технических средств в обрабатывающей фазе производства.

Технология обрабатывающей фазы получила название *планарной* и в основном сформировалась в конце 1950-х — начале 1960-х гг. Планарная технология позволила получать качественные интегральные структуры при высоком выходе годных. Кроме того, эта технология универсальна, пригодна для производства разнообразных приборов, допускает изменение состава операций, что обеспечивает возможность построения гибких автоматизированных производств. Последнее особенно важно для такой быстроразвивающейся отрасли, как микроэлектроника.

По планарной технологии изготавливают в настоящее время большинство биполярных и МДП-схем. Основу ИМС, как известно, составляют микротранзисторы (рис. 1.1, а, б). В биполярной схеме необходимые свойства получаются за счет создания *p-n-p* или *n-p-n*-транзисторов и их соединения. Для отделения схем друг от друга используется изоляция диэлектриком или обратносмещенными *p-n*-переходами.

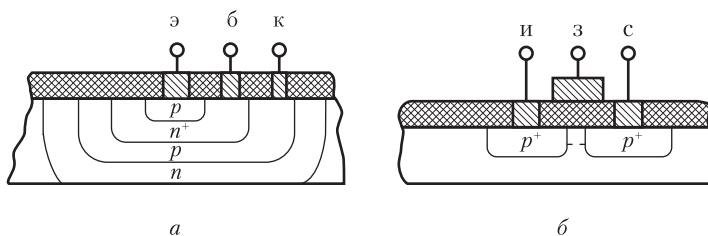


Рис. 1.1. Схемы транзисторов:

а — биполярного (э — эмиттер; б — база; к — коллектор);
б — МДП (и — источник; з — затвор; с — сток)

В МДП-приборах необходимые свойства обеспечивают на границе металл—диэлектрик—полупроводник. Канал с управляемой проводимостью (затвор) при подаче потенциала изменяет электрический ток между истоком и стоком, что и используется для получения эффекта усиления.

С целью выявления общности методов изготовления ИМС сопоставим планарные технологии получения биполярных и МДП-приборов. Все числовые значения, характеризующие транзисторные структуры и приведенные в описании технологий, указаны ориентировочно в работе [6].

Технология биполярных схем. В планарной технологии существуют различные методы получения ИМС. Они различаются способами изоляции элементов друг от друга и формирования транзисторных структур. Рассмотрим *планарно-эпитаксиальную* технологию, получившую широкое распространение в промышленности. Последовательность ее операций приведена на рис. 1.2.

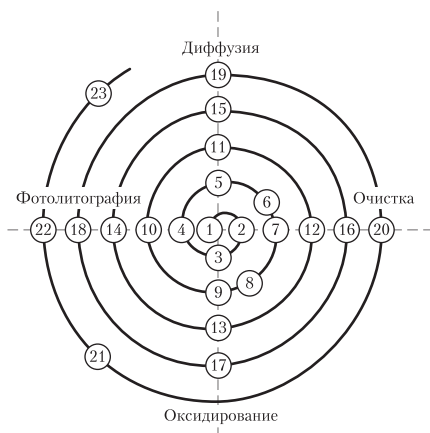


Рис. 1.2. Структурно-технологическая схема изготовления планарно-эпитаксиальных ИМС

Исходным материалом при изготовлении биполярных ИМС служат пластины кремния диаметром 60–150 мм, толщиной 0,2–0,4 мм с удельным сопротивлением 1–10 Ом·см. Пластины при запуске в производство **объединяются в партии** (операция 1) по 10–50 шт. и в дальнейшем обрабатываются на одном и том же оборудовании одновременно или поочередно. Свойства пластин, включаемых в партию, не должны существенно отличаться друг от друга.

Очистка (операция 2) проводится с целью подготовки пластин кремния к последующим операциям. С поверхности удаляются механические загрязнения, химически не связанные с поверхностью, загрязнения, полученные в результате

побочных реакций, а также слой с нарушенной кристаллической структурой, возникающий при механической обработке пластины. Качество очистки строго контролируется.

После очистки проводят первое **оксидирование** (операция 3). Оно необходимо для того, чтобы создать маскирующий слой диоксида кремния толщиной около 1 мкм. Слой получают путем оксидирования пластин в атмосфере сухого или влажного кислорода при температуре 1150 °С. Температура должна поддерживаться с погрешностью не хуже ± 1 °С.

Следующим этапом является **фотолитография** (операция 4). Она предназначена для создания окон в маскирующем слое диоксида кремния. Основным требованием к качеству технологического процесса является высокая точность размеров получаемых окон, расстояний между ними и ровность краев линий, образующих рисунок схемы (топологию). Линейные размеры элементов и расстояние между ними в ИМС могут составлять доли микрометра.

Диффузия (операция 5) должна обеспечить получение хорошо проводящего слоя n^+ под коллектором с удельным сопротивлением 8—10 Ом·м. Он создается путем диффузии мышьяка или сурьмы на глубину 1—2 мкм. Диффузия проводится в две стадии: «загонка» при температуре 800—900 °С и «разгонка» с оксидированием при температуре 1000—1100 °С. Погрешность стабилизации температуры в рабочем объеме не должна превышать $\pm 0,5$ °С, а состав газа, пропускаемого через реактор, должен быть постоянным.

После диффузии проводится **снятие оксида** (операция 6) и поверхность подготавливается путем **очистки** (операция 7) к **эпитаксиальному наращиванию** (операция 8). Эпитаксиальный слой с n^+ -проводимостью имеет толщину 8—12 мкм и удельное сопротивление 0,1—10 Ом·см. Качество слоя определяется электрофизическими свойствами, а также количеством дефектов и дислокаций, которое не должно превышать 10^4 см⁻².

Слой диоксида кремния толщиной 0,5—1 мкм (операция 9) создается для маскирования поверхности с тем, чтобы с помощью **второй литографии** (операция 10) сформировать окна под разделительную диффузию. В планарно-эпитаксиальной технологии электрическое разделение элементов микросхемы проводится с привлечением обратносмещенных p - n -переходов.

Требования к качеству выполнения операций фотолитографии, начиная с этой стадии изготовления, дополняются

условиями точного совмещения нового рисунка с предыдущим.

Двухстадийная диффузия бора (операция 11) выполняется для формирования разделяющих областей с p -проводимостью. Она проводится при температуре 1100 °С («загонка») и 1200 °С («разгонка») с оксидированием в атмосфере сухого кислорода.

Формирование базы транзисторов осуществляется последовательно проводимыми операциями: **очистка поверхности** (операция 12), **оксидирование** (операция 13), **третья фотолитография** (операция 14), **диффузия бора** (операция 15). В результате выполнения этих операций на глубине 2,5–3 мкм создаются области с удельным сопротивлением 50–300 Ом·м.

Требования к качеству выполнения операций и режимам обработки аналогичны описанным выше.

При формировании эмиттера производятся следующие операции: **очистка поверхности** (операция 16), **оксидирование** (операция 17), **четвертая фотолитография** (операция 18), **диффузия фосфора** (операция 19). Результатом этих операций являются области n^+ -проводимостью на глубине 0,8–2 мкм с удельным сопротивлением 5–20 Ом·м.

После **очистки** (операция 20) на поверхность пластины **наносится слой металла**, чаще всего алюминия (операция 21) толщиной 0,2–0,4 мкм, на котором с помощью **пятой фотолитографии** (операция 22) создаются контактные площадки и проводники, соединяющие между собой элементы ИМС. Разводка в схемах с большой степенью интеграции проводится в несколько слоев, при этом слои металла разделяются слоями диэлектрика, а необходимую топологию получают методами фотолитографии.

Последней операцией обрабатывающей фазы является **контроль готовых структур на пластине** (операция 23). После контроля пластина передается в сборочную фазу производства.

Технология МДП-схем. Технология МДП-схем основана на формировании свойств изделий на поверхности полупроводникового или изоляционного материала. Различают три вида схем: n -МДП-, p -МДП-схемы, тип которых определен проводимостью материала под затвором, и комплементарные КМДП-схемы, использующие в качестве элементов приборы обоих типов. Наиболее сложной является технология КМДП-схем, последовательность операций которой приведена на рис. 1.3.

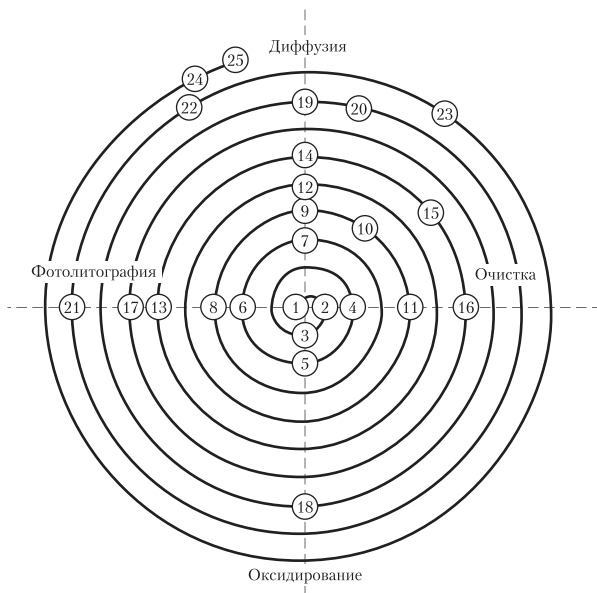


Рис. 1.3. Структурно-технологическая схема изготовления КМДП ИМС

Исходным материалом для получения КМДП-приборов служат пластины кремния с n^+ -проводимостью диаметром 60—150 мм, толщиной 0,2—0,4 мм с удельным сопротивлением 2,5—10 Ом·см. Из однородных по свойствам пластин **формируются партии** (операция 1) для последующей совместной обработки.

После **очистки** (операция 2), **оксидирования** (операция 3) в атмосфере сухого или влажного кислорода, в процессе которого создается слой толщиной 0,9 мкм, и последующей **очистки** (операция 4), во время которой удаляется слой с нарушенной кристаллической структурой, пластина считается подготовленной к операциям, формирующим отдельные области с p -проводимостью — «карманы».

Для получения «кармана» используются следующие операции: **оксидирование** (операция 5), в результате которого получают слой диоксида кремния толщиной 0,5—0,6 мкм при температуре 1200 °С в атмосфере сухого или влажного кислорода; **первая фотолитография** (операция 6), формирующая окна под изолированные области; **диффузия бора** (операция 7), которая обеспечивает введение необходимой примеси за две стадии: «загонку» и «разгонку».

В результате этих операций создаются локальные области с удельным сопротивлением 700 Ом·м на глубине 6 мкм, прикрытые сверху оксидом толщиной 0,5 мкм. Требования к качеству выполнения операций, соблюдению режимов и самим режимам для МДП- и планарно-эпитаксиальной технологий сходны.

Следующая группа операций предназначена для формирования областей истока и стока с каналами p -проводимости. Она включает в себя: **вторую фотолитографию** (операция 8), **первую стадию диффузии бора** — «загонку» (операция 9), **снятие боросиликатного стекла** (операция 10), **очистку** (операция 11), **вторую стадию диффузии бора** — «разгонку» (операция 12).

Каналы с p -проводимостью имеют удельное сопротивление 90 Ом·м на глубине 1 мкм.

При формировании канала n -проводимости выполняются последовательно следующие операции: **третья фотолитография** (операция 13), **«загонка» фосфора** (операция 14), **снятие фосфоросиликатного стекла** (операция 15), **очистка** (операция 16). Удельное сопротивление канала составляет 30–40 Ом·м на глубине 1 мкм.

Слой диэлектрика над затворами формируется с помощью следующих операций: **четвертой фотолитографии** (операция 17), которая предназначена для получения окон над затворами, **наращивания слоя оксида** (операция 18) над затвором толщиной 0,1 мкм. Затем проводят **диффузию фосфора** (операция 19) и для стабилизации свойств изделия — **отжиг** при температуре 1000 °С в атмосфере сухого азота (операция 20).

В результате всех этих операций образуются транзисторные структуры, в которых удельное сопротивление областей «исток-сток», соединенных каналами p -проводимости, составляет 90–100 Ом·м, а соединенных каналами n -проводимости — 12–13 Ом·м на глубине 2 мкм. Транзисторы сформированы в «карманах», граница которых имеет удельное сопротивление 350 Ом·м на глубине 7 мкм.

Пятая фотолитография (операция 21) служит для вскрытия окон под контакты, после чего **наносится слой алюминия** (операция 22) толщиной 0,7–0,8 мкм. Операция 23 проводится для **получения межсоединений**, топология которых получается методами фотолитографии.

После травления для стабилизации свойств металла проводников проводится **термообработка** (операция 24), затем готовые структуры поступают на **контроль** (операция 25).

Получение ИМС по *n*-МДП- и *p*-МДП-технологиям проще, поскольку в них не нужны операции разделения пластины на локальные области (5—7) и используется только одна группа операций, формирующих каналы: либо с 8-й по 12-ю, либо с 13-й по 16-ю. Однако схемные реализации на основе КМДП-приборов более эффективны, что обеспечивает широкое применение КМДП-технологии.

Анализ особенностей технологий и приведенные выше структурно-технологические схемы позволяют выделить и сгруппировать основные операции обрабатывающей фазы. Ими являются:

- обработка поверхности пластины кремния, оксидов и пленок металла или диэлектрика на ней;
- получение топологии ИМС на кремнии, оксидах и металлах;
- формирование свойств материала в отдельных слоях или локальных областях;
- нанесение пленок, слоев из диэлектрика, металла или оксидов.

Эти операции многократно повторяются в процессе получения ИМС и различаются режимами, применяемыми материалами и реактивами. Общие требования планарной технологии заключаются в высокой точности соблюдения режимов обработки, высокой чистоте всех реактивов, используемых в процессе производства, и соблюдения электронной гигиены.

Такая общность позволяет выделить технологическое оборудование, характерное для процесса изготовления ИМС, и на его примере сформулировать типичные задачи управления.

1.2. Основные характеристики оборудования автоматизированного производства микроэлектроники

1.2.1. Обработка поверхности пластин

В формировании элементов ИМС большую роль играют свойства поверхности полупроводникового материала и слоев, наносимых на пластину в различных технологических целях. Обработка поверхности может быть направлена на придание всей поверхности необходимых свойств или изме-

нение свойств в локальной области. Основными операциями, проводимыми на поверхности, являются:

- химическое полирование — удаление на всей пластине слоя с нарушенной кристаллической решеткой;
- травление — селективное удаление материала слоя или пластины;
- очистка — удаление с поверхности материалов после выполнения ими технологических функций и различных загрязнений.

Операции очистки и травления производятся многократно, а технологические процессы различаются применяемыми веществами и режимами, выбираемыми в зависимости от свойств подложек и удаляемого материала. Так, при травлении существенно различаются методы, применяемые при обработке поверхности диоксида кремния, металлов и диэлектриков.

Загрязнения, появляющиеся на поверхности пластин, принято делить на две группы:

- внешние, определяемые качеством окружающей среды (влажностью воздуха в помещении, запыленностью, наличием паров агрессивных веществ и др.);
- внутренние, возникающие как побочные эффекты при выполнении технологических операций. Борьба с этим видом загрязнений особенно сложна.

Для обработки поверхности применяются два метода: химический — «жидкостной» и вакуумно-плазменный — «сухой».

Технология химического метода обработки включает в себя:

- удаление органических соединений, химически не связанных с пластиной, с помощью специальных растворителей (толуола, изопропилового спирта, аммиака и т.п.);
- удаление загрязнений, химически связанных с пластиной, оксидов и других соединений с помощью кислот (плавиковой, соляной или сложными смесями);
- механическое удаление частиц с поверхности пластины, как правило, гидромеханическим способом, совмещающим механическое и химическое воздействия, промывку пластин в депонированной воде, сушку пластин после промывки.

Разнообразие реактивов и режимов обработки, требования высокой чистоты применяемых веществ потребовали разработки оборудования, в котором для каждой операции создается свой рабочий объем — ванна. Материал ванны и активация процесса в ней могут быть различными.

Общими недостатками химического метода обработки являются:

- неуниверсальность, приводящая к необходимости использования различных сред для обработки, что требует выбора специальных конструкционных материалов и способов нейтрализации продуктов реакции;
- возникновение вредных для изделия реакций на поверхности кремния;
- внесение загрязнений.

Кроме того, химическое травление, как правило, изотропно, т.е. при формировании локальных областей удаление пленки происходит с одинаковой скоростью вдоль пленки и по толщине. Это приводит к существенному ограничению линейных размеров элементов ИМС (предельное разрешение — около 1 мкм).

Вакуумно-плазменные методы обработки позволяют избежать некоторых указанных недостатков и обладают большим разрешением. «Сухие» методы более универсальны и обеспечивают:

- низкий уровень загрязнения поверхности;
- хорошую воспроизводимость скорости травления материалов от цикла к циклу;
- высокую равномерность травления поверхности;
- малый уровень загрязнения окружающей среды;
- безопасность работы персонала.

Физико-химический механизм вакуумно-плазменной технологии позволяет выделить следующие типы процессов обработки поверхности.

Ионное травление (ИТ), при котором поверхностные слои материала удаляются в результате физического распыления. Процесс не сопровождается химическими реакциями. Если обрабатываемый материал помещен на электродах или держателях, соприкасающихся с плазмой разряда, то травление называют ионно-плазменным, если же материал отделен от области плазмы — ионно-лучевым.

Плазмохимическое травление (ПХТ) происходит при взаимодействии между поверхностью и химически активными частицами, к которым относятся свободные атомы и радикалы. Если при этом материал находится в области плазмы разряда, то травление называют плазменным, если область реакции отделена от плазмы — радикальным.

Ионно-химическое (ИХТ), или реактивное ионное травление, характеризуется совместным действием физического распыления и химических реакций. Аналогично предыдущему

му при материале, находящемся в области плазмы, процесс называют реактивным ионно-плазменным, альтернативным процессом является реактивный ионно-лучевой.

Сравнительные характеристики химического «жидкостного» травления (ЖХТ) и вакуумно-плазменных методов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Показатели процесса травления

| Характеристики процесса травления | Вид травления | | | |
|--|--------------------|-------------|--|-------------|
| | ЖХТ | ИТ | ПХТ | ИХТ |
| Универсальность | Нет | Да | Нет | Да |
| Разрешающая способность, мкм | $L = L_m + \delta$ | $L = L_m$ | $L = L_m (\frac{1}{2} - \frac{1}{4}) \delta$ | $L = L_m$ |
| Селективность травления | 10–100 | 1–10 | 10–100 | 5–20 |
| Неравномерность травления в партии пластин, % | 1 | 3–5 | 1 | 3–5 |
| Неровность края от полученного размера, % | 10–15 | 3–5 | 3–5 | 3–5 |
| Диапазон технологической скорости травления, нм/с | 1,0–10,0 | 0,1–1,0 | 1,0–10,0 | 0,5–5,0 |
| Совмещение операций травления материала и удаления фоторезиста | Нет | Ограниченно | Да | Ограниченно |
| Очистка поверхности после травления | Да | Нет | Нет | Нет |
| Управление травлением с помощью ЭВМ | Нет | Да | Ограниченно | Да |

Примечание. L_m – ширина линии; δ – толщина пленки фоторезиста.

Оборудование вакуумно-плазменной обработки более сложно, чем химической, но оно перспективнее с точки зрения

автоматизации. Сопоставление разных методов вакуумно-плазменного травления приведено в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Характеристика режимов вакуумно-плазменного травления

| Параметры | Вид травления | | | | | |
|---|---------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|--|
| | ИТ | | ИХТ | | ПХТ | |
| | плазменное | лучевое | реактивное плазменное | реактивное лучевое | плазменное | радикальное |
| Скорость травления, нм/с | 0,1–1 | 0,3–3 | 1–5 | 0,3–3 | 2–10 | 1–3 |
| Анизотропность | 5–10 | 10–10 ² | 5–30 | 10–10 ² | 2–5 | 2–5 |
| Разрешающая способность травления, мкм | 0,5–0,7 | 0,3–0,5 | 0,4–0,6 | 0,3–0,5 | 0,7–1 | 0,7–1 |
| Селективность травления | 2–5 | 2–5 | 5–10 | 5–10 | 10–30 | 20–50 |
| Равномерность травления на диаметре 100 мм, % | 90–95 | 95–97 | 90–95 | 95–97 | 80–90 | 90–95 |
| Давление рабочего газа, Па | 1–10 | 10 ⁻³ –10 ⁻² | 1–5 | 10 ⁻² –0,5 | 50–10 ³ 10–10 ² 0,1–1 | 50–10 ³ 10–10 ² |
| Расход газа, см ³ /мин | 20–5 | 1–10 | 20–50 | 1–20 | 50–10 ² | 50–10 ² |
| Температура подложки, °С | 200–400 | 150–300 | 150–250 | 100–200 | 150–200 | 100–200 |

1.2.2. Литография

Важное место в планарной технологии занимают операции литографии, предназначенные для получения топологии ИМС, т.е. изображения элементов, их размещения и изготовления электрических соединений между элементами на заключительной стадии.

Формирование топологии осуществляется либо с помощью масок, либо непосредственно лучом на поверхности защитной пленки — резиста. Главная роль в процессах литографии принадлежит операции экспонирования, поскольку именно она создает рисунок на пленке резиста, который затем химическими или вакуумно-плазменными методами переносится на пластину. Характеристики различных способов экспонирования приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Характеристики различных способов экспонирования

| Способ экспонирования | Длина волны, нм | Предельное разрешение, мкм | Достигнутый уровень | | | | |
|---|---|----------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------|----------|-------------------|
| | | | разрешение, мкм | размер поля, см ² | время экспонирования, с | | |
| | | | | | модуль | пластина | |
| Контактная фотопечать | 310 | 0,3 | 0,5 | 90 | — | 5 | |
| Проекционная фотопечать: с мультипликацией в видимом свете | 436 | 0,6 | 1,0 | 1 | 1 | — | |
| | в ультрафиолетовом излучении 20—200 | 0,25 | 0,6 | 1 | 1 | — | |
| Электронно-лучевой: | векторное сканирование | — | 0,1 | 0,3 | 0,04 | — | 4·10 ³ |
| | | растровое сканирование | 0,02—0,5 | 0,5 | 1,0 | 0,05 | — |
| | изменение формы луча | — | 0,2 | 0,4 | 0,04 | — | 300 |
| | проекционное сканирование 1 × 1 | — | 0,5 | 1,0 | 80 | — | 50 |
| | проекционное сканирование с уменьшением | — | 0,1 | 0,4 | 0,3 | — | 500 |

Окончание табл. 1.3

| Способ экспонирования | Длина волны, нм | Предельное разрешение, мкм | Достигнутый уровень | | | |
|---|-----------------|----------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------|----------|
| | | | разрешение, мкм | размер поля, см ² | время экспонирования, с | |
| | | | | | модуль | пластина |
| Рентгеновский: | | | | | | |
| точечный источник | 0,8–4,4 | 0,3 | 1,0 | 80 | — | 200 |
| плазменный источник | 0,8 | 0,3 | 1,0 | 0,1 | — | 200 |
| синхронное излучение | 0,1–10 | 0,1 | 0,3 | 10 | 1,0 | — |
| Ионно-лучевой: | | | | | | |
| растровое сканирование | 0,01–0,1 | 0,05 | 0,5 | 0,01 | 0,1 | — |
| проекционное сканирование с уменьшением | 0,05–0,1 | 0,05 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | — |

Выбор способа экспонирования определяется разрешающей способностью и экономическими показателями — производительностью и стоимостью технологического оборудования.

Структура процессов различных методов литографии сходна, поэтому остановимся подробнее на особенностях технологии фотолитографии.

Фотолитография. Процесс фотолитографии (рис. 1.4) включает стадии:

- формирование пленки фоторезиста (операции 1–3);
- получение изображения на фоторезисте (операции 4–6);
- перенос изображения на оксид или металл (операция 7).

Операции 8–12 обеспечивают выполнение технологического процесса на соответствующих стадиях.

Для **очистки поверхности** (операция 1) и **травления** (операция 7) используются как химические, так и вакуумно-плазменные методы, рассмотренные ранее. К оборудованию для

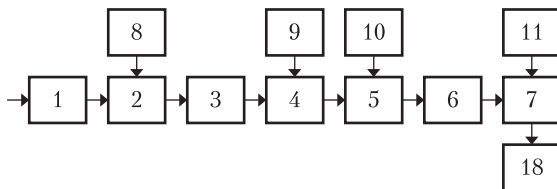


Рис. 1.4. Технологический процесс фотолитографии:

1 — очистка пластины; 2 — нанесение фоторезиста; 3 — сушка; 4 — совмещение и экспонирование; 5 — проявление; 6 — сушка и задубливание; 7 — травление; 8 — подача фоторезиста; 9 — комплект фотошаблонов; 10 — подача проявителя; 11 — подача травителя; 12 — удаление фоторезиста

нанесения пленки фоторезиста (операция 2) предъявляются следующие требования:

- нанесенная пленка не должна иметь дефектов (проколов, вкраплений, разрывов и т.п.);
- толщина пленки должна быть воспроизводимой от процесса к процессу и равномерной по площади пластины;
- пленка должна иметь хорошую адгезию к поверхности пластины.

Для нанесения пленки фоторезистов используются центрифугирование, распыление, окунание, накатка. Наибольшее распространение в настоящее время получило оборудование для центрифугирования. В нем пленка формируется под действием центробежных сил, растягивающих каплю фоторезиста на поверхности быстровращающейся пластины. Неравномерность толщины пленки при этом не превышает $\pm 10\%$.

В состав установок обычно входят: центрифуга, на которой могут размещаться одновременно от одной до десяти пластин; механизм крепления пластин (обычно вакуумный присос); форсунка для дозированной подачи фоторезиста; устройства для загрузки и выгрузки пластин.

Получение качественной пленки возможно только в условиях высокой очистки среды (нулевой или первый класс электронной гигиены). Допускается от одной до четырех пылинок диаметром 0,5 мкм и более в литре воздуха. Нанесение производится в неактивном свете, длина волны которого зависит от типа фоторезиста.

Процесс **сушки** (операция 3) определяет такие важные показатели пленки, как адгезия, наличие внутренних напряжений, которые могут приводить к появлению трещин, и стойкость к кислотам.

В оборудовании для сушки используются методы нагрева в ИК- и СВЧ-диапазонах. Нагрев производится в печи в среде инертного газа (обычно осушенного азота). Температура в рабочей камере стабилизируется с погрешностью $\pm 5^\circ\text{C}$.

Большое внимание при конструировании печей и выборе режима сушки уделяется скорости испарения растворителя из пленки и удалению паров из рабочего пространства. Это объясняется тем, что в процессе сушки могут образовываться проколы при прохождении пузырьков газа через пленку. Для уменьшения разрывов и проколов сушка проводится в две стадии: сначала при комнатной температуре, а затем при нагреве до $100\text{--}140^\circ\text{C}$.

Повышение качества пленки достигается применением термокомпрессионной сушки, которая осуществляется при давлении $(5\text{--}7) \cdot 10^5$ Па. В этом случае сушка проводится в одну стадию при температуре 200°C ; полученная пленка хорошо обрабатывается в холодных растворителях.

В состав установок для сушки входят: рабочая камера с источниками ИК- или СВЧ-нагрева, стол для размещения пластин, источники питания нагревателя, газовая система. Установки для сушки должны помещаться в вытяжные шкафы, поскольку при сушке испаряются вредные вещества.

Формирование топологии на фоторезистивной пленке осуществляется путем **облучения через маску-фотошаблон** (операция 4). Для последовательно получаемых изображений (см. рис. 1.2, 1.3) используются разные шаблоны, которые изготавливаются в виде комплекта. Изображения должны быть совмещены друг с другом с высокой точностью.

В производстве используются установки для контактной и проекционной печати. В состав установок обычно входят: устройства совмещения автоматические или ручные, механизм фиксации пластины и фотошаблона, оптическая система, координатный стол, осветитель, устройства загрузки и выгрузки пластин. Установки совмещения и экспонирования эксплуатируются в помещениях нулевого или первого класса электронной гигиены.

Задача **проявления** (операция 5) — сформировать на пленке фоторезиста защитную маску с нужной топологией. Рисунок получают обработкой облученных зон реактивами. При использовании позитивных фоторезистов пленка после химической обработки разрушается, а у негативных фоторезистов — полимеризуется.

При проявлении пластина последовательно обрабатывается несколькими реактивами, выявляющими рисунок, фиксирующими свойства материала и растворяющими необлученную область (негативный процесс) или области, подвергнутые облучению (позитивный процесс). Операция заканчивается промывкой.

В установках для проявления проявитель на пластину подается методами полива, распыления, окунания.

Повышение требований к качеству процессов фотолитографии, увеличение объемов выпуска ИМС, а также необходимость исключения человека из непосредственного участия в технологический процесс привели к созданию автоматических и автоматизированных линий фотолитографии. Общими принципами построения таких линий являются:

- индивидуальная обработка пластин методом «из кассеты в кассету», исключающая участие оператора в перегрузке пластин;
- автоматическая транспортировка пластин либо на воздушной подушке, либо с помощью транспортера в специальных спутниках;
- автоматическая установка пластин в рабочую позицию и обратная передача на транспортер;
- управление операциями с помощью микропроцессорных систем, связанных с ЭВМ более высокого уровня, откуда поступают программы обработки пластин.

Транспортная система таких линий представляет собой закрытый канал, защищенный от проникновения пыли и актиничного освещения. При трении движущиеся механизмы транспортной системы не должны образовывать пыль и электростатические заряды.

Электронно-лучевая литография. Применение электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) позволяет повысить степень интеграции за счет более высокой разрешающей способности и улучшить экономические показатели благодаря повышению выхода годных изделий и сокращению затрат на изготовление шаблонов.

В производстве изделий микроэлектроники ЭЛЛ используется для получения фотошаблонов, СВЧ- и ПЗС-приборов (прибор с зарядовой смесью), приборов на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) и запоминающих устройств на цилиндрических магнитных доменах.

Технология ЭЛЛ сводится к созданию маскирующего рельефа на подложке и экспонированию электронным лучом,

при этом применяются как негативные, так и позитивные (электронные) резисты. Удаление резиста после облучения производится, как правило, вакуумно-плазменным методом.

Для формирования рисунка применяются следующие методы (см. табл. 1.3):

- векторное сканирование, при котором остросфокусированный луч перемещается только по формируемым топологическим фигурам;
- растровое сканирование, при котором луч проходит всю площадь пластины, включаясь только на тех участках, которые должны быть экспонированы;
- экспонирование изменяющейся формой луча, которое предусматривает одновременное облучение определенного кадра (элемента топологии).

Последний метод обладает наибольшей производительностью, но разработка оборудования для его реализации сопряжена со значительными трудностями при создании электронно-оптической системы.

1.2.3. Физико-термические процессы

Базу и эмиттер транзистора, а также диффузионные сопротивления получают путем дозированного введения примесей в кремний.

Операции литографии определяют размеры и конфигурацию областей — окон на поверхности маскирующего слоя оксида кремния, а формирование объема с необходимым типом проводимости осуществляется с помощью термической диффузии или ионной имплантации. Эти операции должны обеспечивать строгое соблюдение количества и распределения примесей в материале подложки (пластины). Последнее требование обычно связано с глубиной залегания примесей и областью распространения примесей за пределы окна.

Поскольку объективный контроль процесса внедрения примеси невозможен, особое внимание при разработке оборудования и систем управления уделяется обеспечению оптимальных технологических режимов. Выборочный контроль результатов процесса позволяет определять его эффективность путем оценки выхода работоспособных изделий.

Термическая диффузия. Существуют многочисленные методы термической диффузии, из которых наиболее распространенными являются метод «запаиваемой ампулы», диффузия

в вакууме, метод «открытой трубы». Общими для всех методов являются: создание источника примеси на полупроводнике или вблизи его поверхности; нагрев полупроводника до температур, обеспечивающих приемлемую для производства скорость диффузии; прекращение процесса, когда по расчетам границы легированной области соответствуют заданным.

При изготовлении биполярных и МДП-схем наибольшее распространение получил в настоящее время метод «открытой трубы». Диффузия при этом выполняется в две стадии. На первой («загонке») диффузانت переносится инертным газом к пластинам и насыщает через открытые окна поверхностный слой. Концентрация примесей обычно определяется предельной растворимостью примеси (бора или фосфора) в кремнии. Вторая стадия («разгонка») проводится с целью получения заданного профиля залегания примеси в полупроводнике. На этой стадии под действием температуры диффузия происходит в глубине материала. Для выравнивания концентрации наружный слой обедняют путем выращивания оксида на поверхности, в который переходит часть примеси.

Ионная имплантация. Метод ионной имплантации обеспечивает непосредственное внедрение атомов примеси в кристаллическую решетку в месте падения луча, содержащего ионы диффузанта. Это позволяет строить технологический процесс без многократного окисления, т.е. уменьшает число операций, проводимых при высокой температуре. Дозирование энергии частиц в луче позволяет получать области субмикронных размеров с заданной проводимостью.

Границы областей определяются в этом случае соударениями ионов луча с атомами кристаллической решетки и формой луча.

Недостатком метода являются радиационные повреждения решетки. Для их уменьшения необходимо строгое соблюдение дозировки энергии частиц в луче, что трудно обеспечить из-за стохастических свойств распределения энергии частиц по сечению луча.

1.2.4. Нанесение слоев

При изготовлении ИМС тонкий слой материалов используется как в качестве элементов транзисторов и схем, так и в технологических целях. К первому направлению относятся выращивание эпитаксиальных слоев, получение металлических слоев для разводки и контактных площадок схем,

защита схем от внешних воздействий (пассивация). Второе направление связано с получением маскирующих слоев для операций литографии и диффузии. Эти слои после выполнения операции частично или полностью уничтожаются — стравливаются. Оборудование, применяемое для этого, было описано ранее.

Различное назначение слоев, разнообразие применяемых материалов определяют различные требования к технологическим процессам и оборудованию. Общими требованиями, предъявленными к слоям, являются:

- однородность и повторяемость свойств слоев;
- отсутствие в слоях локальных нарушений, проколов и других дефектов;
- высокая адгезия слоев и четкость границ слоев, отличающихся физическими свойствами.

Эпитаксиальные слои. Эпитаксиальный слой выращивают на поверхности кремниевой пластины с целью получения на ней трех видов проводимости. Обычно на низкоомной подложке с удельным сопротивлением 0,01—0,001 Ом·см выращивается слой толщиной 10—20 мкм и сопротивлением примерно 1—5 Ом·см.

При получении эпитаксиального слоя используются прямые методы, основанные на перемещении вещества от источника к подложке без химических реакций, и косвенные, при которых на поверхности подложки происходит реакция с осаждением материала. Наибольшее распространение получил хлоридный метод, выполняемый по схеме «открытой трубы».

Слои материалов и диэлектриков. Основным методом получения тонких слоев металлов и диэлектриков служит нанесение их в вакууме. В основе метода лежат испарение материала при разогреве и последующая конденсация паров на подложке. Технологический процесс требует создания в рабочей камере разряжения и определенного состава среды. В самом процессе выделяют три фазы: образование потока вещества из испарителя, формирование потока в пространстве «испаритель-подложка» и конденсация паров на подложке.

Можно выделить три обоснованных метода, используемых для получения слоев (рис. 1.5): термовакуумное нанесение, катодное распыление, ионно-плазменное распыление.

При **термовакuumном распылении** наносимое вещество испаряется с помощью резистивного нагрева или электронного луча. Давление в рабочей камере в этом случае должно быть

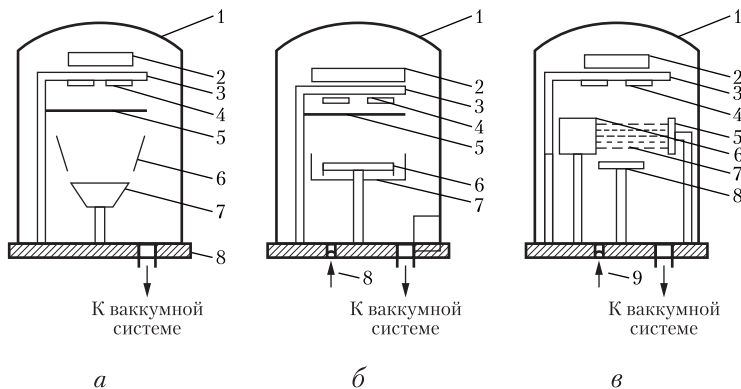


Рис. 1.5. Методы нанесения слоев:

a — термовакuumное нанесение; *б* — катодное распыление; *в* — ионно-плазменное распыление

на несколько порядков ниже, чем парциальное давление паров испаряемого вещества. Поток паров — атомарный и проходит без соударений, т.е. расстояние «испаритель—подложка» меньше длины свободного пробега. Это определяет требования к высокому вакууму в рабочем объеме под колпаком установки. Для обеспечения конденсации подложка должна иметь определенную температуру.

При этом методе (рис. 1.5, *a*) под колпаком 1 размещаются нагреватель подложки 2, подложкодержатель 3 с подложками 4. Для нанесения слоев одинаковой толщины на все подложки подложкодержатель приводится во вращение специальным приводом, размещаемым обычно вне рабочей камеры.

Время, в течение которого может наноситься слой, определяется положением заслонки 5. Заслонка также защищает поверхность пластины от попадания посторонних примесей при прогреве камеры для дегазации. Для предохранения внутренней поверхности колпака от запыления применяются экраны 6. Испаряемое вещество помещается в испаритель 7. Испаритель может быть выполнен в виде тигля, лодочки из тугоплавкого металла или керамики или представляет собой спираль, на которую навешаны частицы испаряемого вещества.

Плита 8 служит для установки всех устройств, через ее уплотненные вводы приводятся в движение механизмы под-

колпачных устройств и подается электропитание. Плита имеет отверстие для соединения с вакуумной системой.

Катодное распыление проводится при низком вакууме (0,66–1,133 Па) в среде нейтрального газа. Распыление вещества происходит под действием бомбардировки катода ионизированными молекулами газа.

Для выполнения операции (рис. 1.5, б) в рабочей камере 1 имеются анод 2 и подложкодержатель 3 с подложками 4. Время нанесения пленки отсчитывается с момента открытия заслонки 5. Испаряемым является материал катода 6 или вещество, помещаемое на его поверхность. Катод прикрыт экраном 7. Давление в камере во время технологического процесса стабилизируется за счет управляемого натекания через игольчатый натекатель 8. Вакуумная система установки при этом работает непрерывно.

Ионно-плазменное распыление проводится при давлении 0,13–0,07 Па. В камере 1 (рис. 1.5, в) установлен подогреватель подложек 2, рядом с которым находится подложкодержатель 3 с подложками 4. Источник ионов 5 и анод 6 создают в камере ионизированную плазму 7. Отрицательный потенциал, подаваемый на мишень 8, вытягивает из плазмы ионы, которые, бомбардируя мишень, распыляют ее. Давление в камере регулируется игольчатым натекателем 9.

Достоинства методов катодного и ионно-плазменного нанесения слоев заключаются в их высокой производительности, хорошей воспроизводимости получаемых слоев и универсальности. Недостатком методов является проведение процессов в низком вакууме, что не позволяет получать слои с особо чистым составом.

Большим недостатком вакуумных установок является значительное время откачки рабочего объема, поэтому в последние годы стремятся получить установки непрерывного действия за счет создания шлюзовых камер для загрузки и выгрузки.

Слои оксида. Слои диоксида кремния используются в ИМС для изоляции при многослойной разводке, защиты поверхности кристалла и маскирования в литографии. Наиболее распространенным способом является получение оксида с помощью термического окисления, выполняемого в диффузионных печах. В этом случае окисление кремния проводится путем пропускания через кварцевую трубу сухого или влажного кислорода в течение заданного времени.

Кроме термического окисления применяется пиролитическое осаждение. Этот процесс проводится при более

низких температурах и использует реакцию между силаном и кислородом на поверхности пластины.

Возможно применение катодного и ионно-плазменного распыления кремния в смеси кислорода и аргона. Выбор метода нанесения определяется назначением слоя и совместимостью процесса с другими технологическими операциями.

1.3. Подсистемы технологического оборудования

Анализ различных видов оборудования, применяемого в производстве ИМС, позволяет выделить в его составе типичные функциональные подсистемы (рис. 1.6). Но назначению их можно разделить на три группы:

- технологические, результаты работы которых непосредственно влияют на свойства ИМС;
- обеспечивающие, создающие условия эффективного процесса обработки; результаты работы этих систем сказываются на качестве ИМС опосредованно;
- вспомогательные, участвующие в выполнении операций по транспортированию предметов труда и защите.

При проектировании оборудования функции различных подсистем могут совмещаться. Технологические и обеспечивающие подсистемы определяют особенности выполнения операций, а вспомогательные являются общими для различных видов оборудования.

Основная задача подсистемы энергопотребления — снабжение оборудования электроэнергией, сжатым воздухом, горячей водой и т.п. Причем качество энергоносителя должно удовлетворять требованиям технологического процесса. Включение в состав оборудования подсистемы защиты вызвано использованием в технологическом процессе токсичных и взрывоопасных веществ, наличием высокого напряжения. В задачи подсистемы входят:

- обеспечение безопасности обслуживающего персонала, что достигается применением блокировок, предотвращающих несанкционированный или случайный доступ к частям оборудования, опасным для человека;
- экологическая защита, что достигается нейтрализацией опасных для окружающей среды продуктов реакции;
- аварийная защита оборудования и предметов труда.

| Подсистемы | Назначение и вид технологического процесса | | | | | | | |
|-----------------------|--|-----|------------|----|----------------------|---|-----------------|----|
| | обработка поверхности | | литография | | формирование свойств | | нанесение слоев | |
| | ЖХТ | ПВТ | ФП | ЭЛ | Д | И | Э | НС |
| Легирования | | | | | | | | |
| Осаждения | | | | | | | | |
| Травления | | | | | | | | |
| Экспонирования | | | | | | | | |
| Распыления | | | | | | | | |
| Нагрева | | | | | | | | |
| Охлаждения | | | | | | | | |
| Термостатирования | | | | | | | | |
| Подачи газов | | | | | | | | |
| Откачки | | | | | | | | |
| Позиционирования | | | | | | | | |
| Загрузки и шлюзования | | | | | | | | |
| Транспортирования | | | | | | | | |
| Энергообеспечения | | | | | | | | |
| Пылезащиты | | | | | | | | |
| Защиты | | | | | | | | |

Назначение подсистем:

 — технологическое

 — обеспечивающее

 — технологическое и обеспечивающие

 — вспомогательное

Рис. 1.6. Типичные подсистемы технологического оборудования:

ЖХТ — жидкостное химическое травление; ПВТ — вакуумно-плазменное травление; ФП — фотопечать; ЭЛ — электронная литография; Д — диффузия; И — имплантация; Э — эпитаксия; НС — нанесение слоев

Разнообразие транспортных систем определяется условиями выполнения технологического процесса, например, в вакууме, тепловом и электромагнитном поле, и организацией передачи предметов труда поштучно в транспортных или технологических кассетах. При повышении уровня автоматизации требования к транспортным системам возрастают.

Обязательной частью всех видов технологического оборудования является микропроцессорная система управления (МПСУ). Она обеспечивает согласованное функционирование устройств, входящих в подсистемы. Технические средства ее должны реализовывать функции управления, изменять параметры подсистем (технологических процессов, изделий, создаваемых структур и т.п.), преобразовывать и обрабатывать полученную информацию и формировать управляющие воздействия на объект управления.

На рис. 1.7 представлена структурная схема технических средств МПСУ. Центральное место в ней занимают микропроцессорные устройства управления — программируемые логические и регулирующие контроллеры, контроллеры смешанного типа, микроконтроллеры.

Вместе с тем в системах управления даже с микропроцессорными средствами управления нередко используют аналоговые регуляторы и «жесткие» логические контроллеры. Применение указанных типов устройств обусловлено в ряде случаев необходимостью создания двухконтурных систем регулирования, что значительно улучшает динамические характеристики систем стабилизации и подсистем безопасности и защиты оборудования.

Важным элементом системы управления являются датчики параметров функциональных подсистем и параметров обрабатываемых изделий. Разнообразие физико-термических процессов, реализуемых в оборудовании, трудности измерения параметров создаваемых структур делают задачу контроля весьма сложной.

В качестве измерительных преобразователей используются как серийно выпускаемые средства, так и специальные преобразователи, разработанные для конкретных технологических процессов.

Для сопряжения измерительных преобразователей с устройствами микропроцессорного управления используются нормирующие преобразователи, которые с достаточно высокой точностью усиливают напряжение низкого уровня

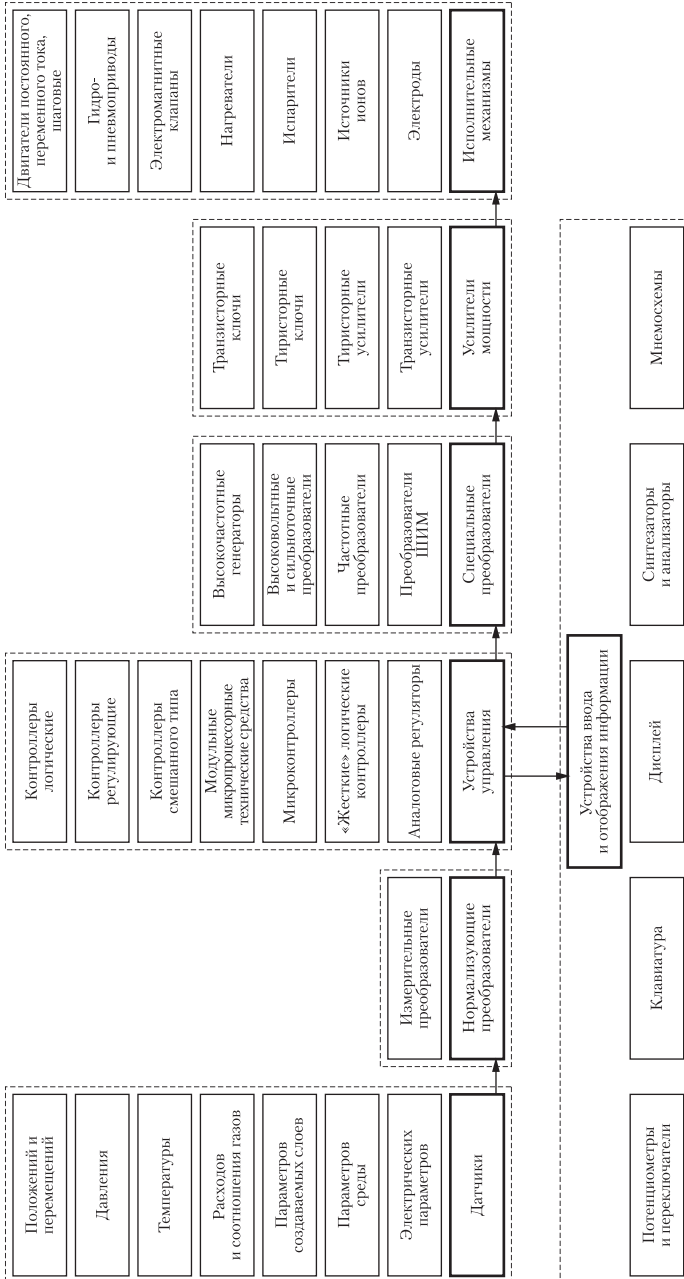


Рис. 1.7. Структура и состав технических средств MPSU

измерительных преобразователей до стандартного уровня 0–10 В.

Управляющие воздействия с устройства управления поступают на исполнительные механизмы (см. рис. 1.7) оборудования через усилители мощности и специальные преобразователи.

Задание программы управления, параметров технологического процесса и контроль за протеканием процесса производятся с помощью устройств ввода и отображения информации. В микропроцессорных системах управления такими устройствами являются дисплей и клавиатура. В последние годы в системах управления находят все более широкое применение акустические устройства общения человека с ЭВМ: синтезаторы и анализаторы речи. Вместе с тем наряду с современными средствами отображения информации применяются и такие средства, как мнемосхемы, на которых выводится информация о состоянии отдельных устройств и подсистем.

Глава 2

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Создание комплексных автоматических систем и быстродействующих вычислительных машин являются важным этапом научно-технического прогресса. Использование средств автоматики и вычислительной техники позволяет автоматизировать трудоемкие процессы, экономить энергоресурсы, снижает себестоимость продукции и повышает ее качество.

Уровень и качество автоматического контроля, регулирования и сигнализации определяет точность и надежность измерительных приборов. Одним из этапов повышения качества и надежности автоматических устройств является уменьшение габаритных размеров. Применение в автоматизированном контроле микропроцессоров дает возможность разработать микроавтоматические устройства, которые позволяют создавать и внедрять в промышленность миниатюрные электронные управляющие машины и промышленные приборы.

Система управления технологическими процессами в основном базируется на элементной базе, содержащей электрические, электронные, электромеханические, магнитные, гидравлические и другие устройства. В последние десятилетия особенно интенсивное развитие получили электронные устройства автоматики. Шире внедряются компьютеры в системы управления, что подняло уровень автоматизации технологических процессов на новую, более высокую ступень. На базе микропроцессорной техники стало возможным внедрение

самонастраивающихся и самообучающихся автоматических систем, реализующих сложные законы управления [4].

2.1. Основные понятия и определения

Автоматизация технологических процессов — это преобразование неэлектрических параметров в электрические, регистрация технологических параметров, передача информации, принятие решения и управление состоянием объектов.

Основными параметрами технологических процессов являются температура, давление, уровень, масса, объем, расход, качество, состав и другие электрические и неэлектрические величины.

Для контроля величин этих параметров необходимо вести измерения непрерывно. Результаты измерений сравниваются с требуемыми значениями контролируемого параметра, а если имеются отклонения, то подается сигнал об отклонении. Отклонения могут быть положительными или отрицательными, уменьшения или повышения и так далее. По отклонениям принимается решение и подается сигнал на объект управления. В процессе принятия решения могут участвовать человек-оператор или устройство.

Под управлением понимают такую организацию процесса, которая обеспечивает заданный характер протекания процесса. При этом сам процесс (совокупность технических средств — машин, орудий труда, т.е. исполнителей конкретного процесса) с точки зрения управления является объектом управления (ОУ), а переменные, характеризующие состояние процесса, называются управляемыми переменными или управляемыми величинами.

Автоматическое управление (регулирование) — это осуществление какого-либо процесса без непосредственного участия человека, с помощью соответствующих систем автоматики. Если автоматическое управление призвано обеспечить изменение (поддержание) управляемой величины по заданному закону, то такое автоматическое управление называют автоматическим регулированием.

Технические устройства, выполняющие операции управления (регулирования), называются автоматическими устройствами.

Совокупность средств управления объектов образует систему управления.

Систему, в которой все рабочие и управляющие операции выполняют автоматические устройства, называют автоматической системой.

Условно систему автоматического управления (САУ) можно разделить на две части: регулятор и объект управления (ОУ) (рис. 2.1).

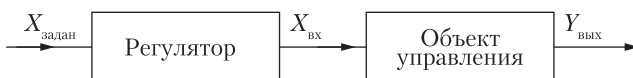


Рис. 2.1. Функциональная схема САУ

Объектами управления могут быть технологические установки, отдельные параметры технологического процесса, различные двигатели и т.д. Воздействия, прикладываемые к регулятору для обеспечения требуемых значений управляемых величин, являются управляющими воздействиями. Управляющие воздействия называют также входными величинами, а управляемые — выходными величинами. Таким образом, всякий технологический процесс характеризуется совокупностью физических величин, называемых показателями или параметрами процесса.

Величины, характеризующие состояния объекта управления, схематически можно показать следующим образом (рис. 2.2).

Рассмотрим приведенные определения и понятия на конкретном примере, в качестве которого возьмем систему регулирования частоты вращения электродвигателя постоянного тока (рис. 2.3). Здесь ОУ является электродвигатель M , характеризующийся частотой вращения ω . Изменение величины ω достигается изменением напряжения $U_{\text{я}}$, подводимого к якорю электродвигателя. Очевидно, что величина $U_{\text{я}}$ и величина ω будут максимальными, если ползунок m потенциометрического реостата Π окажется в крайнем нижнем положении. При перемещении ползунка m в крайнее верхнее положение $U_{\text{я}} = 0$ и соответственно $\omega = 0$. Таким образом, перемещая ползунок m от крайнего нижнего положения в крайнее верхнее, можно изменять частоту вращения ω от максимального значения до нуля. Для удобства контроля частоты вращения

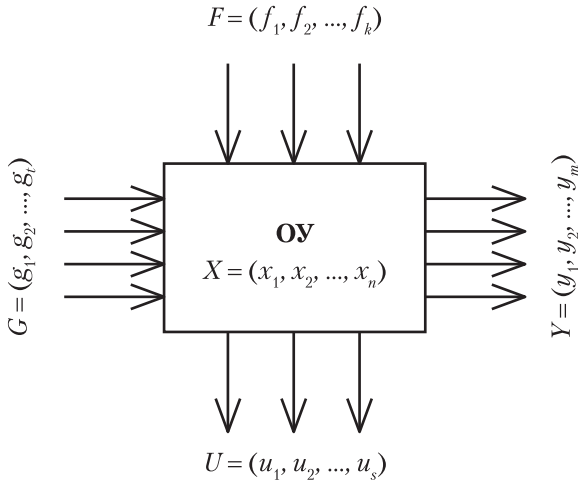


Рис. 2.2. Характеристики состояния объекта управления:

$G = (g_1, g_2, \dots, g_r)$ – вектор совокупности контролируемых воздействий;

$F = (f_1, f_2, \dots, f_k)$ – вектор неконтролируемых воздействий;

$U = (u_1, u_2, \dots, u_s)$ – вектор управляющего воздействия;

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ – вектор управляемых величин;

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор состояния объекта.

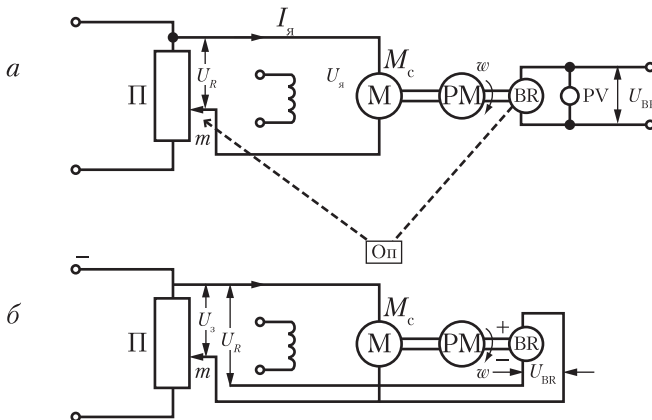


Рис. 2.3. САУ частоты вращения электродвигателя постоянного тока:

а – разомкнутая система регулирования; б – замкнутая система регулирования

с валом электродвигателя связан вал тахогенератора BR — электрического генератора, преобразующего величину ω в напряжение $U_{BR} = K_{BR}\omega$. Вольтметр PV, включенный на напряжение тахогенератора U_{BR} , градуируется в единицах измерения частоты вращения (рад/с) или скорости вращения вала электродвигателя (мин^{-1}).

Представленная на рис. 2.3, а система регулирования является разомкнутой, а регулирование в ней осуществляется по разомкнутому циклу. Разомкнутая система характеризуется тем, что изменения регулируемой величины не передаются на вход системы и не изменяют значения регулирующей (управляющей) величины. Регулирование в разомкнутой системе осуществляется с участием человека-оператора (Оп), который, наблюдая за значением регулируемой величины по регистрирующему прибору, устанавливает такое значение регулирующей величины, которое необходимо для обеспечения заданного режима работы системы. Таким образом, в рассмотренной разомкнутой системе осуществляется ручное, неавтоматическое регулирование.

Для обеспечения автоматического регулирования необходимо провести замыкание системы, что достигается введением в систему обратной связи, под которой понимают совокупность устройств (в данном примере цепь П-М-BR-П), передающих изменения выходной (регулируемой) величины на вход системы. Таким образом, разомкнутая система регулирования (см. рис. 2.3, а) превращается в замкнутую (см. рис. 2.3, б). При этом необходимо соблюдать условие

$$U_{я} = U_{з} - U_{BR},$$

где $U_{з}$ — задающее напряжение, снимаемое с потенциометра, в данном случае является входной величиной. При возрастании момента сопротивления M_c на валу электродвигателя, определяемого условиями работы рабочей машины РМ, частота вращения ω уменьшается. Это вызовет уменьшение величины U_{BR} и последующее автоматическое возрастание величины $U_{я}$ согласно уравнению $U_{я} = U_{з} - U_{BR}$ и, следовательно, увеличение ω .

Таким образом, в системе возникают условия автоматического поддержания выходной величины на заданном уровне, устанавливаемом соответствующим положением ползунка. Очевидно, что при уменьшении значения M_c и возрастании

частоты вращения значение $U_{я}$ будет автоматически уменьшаться, обеспечивая вновь автоматическое регулирование ω .

2.2. Регуляторы уровня жидкости и центробежный регулятор скорости вращения

С целью регулирования и управления состояниями объектов разрабатывались различные регуляторы. В 1765 г. И. И. Ползуновым впервые был изобретен регулятор уровня воды (рис. 2.4), затем в 1784 г. шотландский инженер Дж. Уатт создал центробежный регулятор скорости вращения (рис. 2.5).

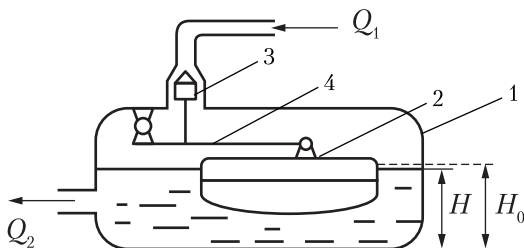


Рис. 2.4. Принципиальная схема регулятора уровня воды:
1 — объект управления; 2 — поплавок — измерительный элемент;
3 — игла — исполнительный элемент; 4 — рычаг

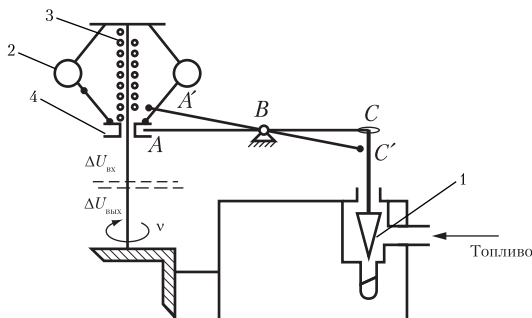


Рис. 2.5. Схема центробежного регулятора скорости вращения:
1 — игла — исполнительный элемент; 2 — груз — измерительный элемент;
3 — пружина — чувствительный орган; 4 — муфта

Принцип действия регулятора уровня воды следующий: регулируемым (контролируемым) параметром является уровень жидкости H_0 в резервуаре. Регулирующим воздействием является поток жидкости Q_1 , который протекает по трубе и через проходное сечение в игольчатом клапане 3 поступает в бак. Возмущающим воздействием является расход жидкости Q_2 , вытекающей из бака. В регуляторе имеется поплавок 2, соединенный с рычагом 4. С рычагом 4 связана игла 3. При изменении значения расхода жидкости (нагрузка), т.е. при нарушении баланса между Q_1 и Q_2 , наблюдается отклонение уровня жидкости в баке от установившегося значения. В результате меняется положение поплавка 2, изменяется проходное сечение под иглой 3 и соответственно с этим изменяется поступления жидкости так, что снова восстанавливается исходный уровень. Если изменение уровня вызывается изменением нагрузки, то восстановление будет неполным. С увеличением нагрузки Q_2 для поддержания заданного уровня H_0 проходное сечение под иглой 3 переводится в новое положение. При этом рычаг 4 и поплавок 2 тоже занимают новое положение. Это положение отличается от исходного, т.е. появляется погрешность регулирования $D_H = H_0 - H$, которая называется статической погрешностью регулирования.

Принцип действия центробежного регулятора скорости вращения следующий. При увеличении скорости вращения механизма $\Delta U_{\text{вых}}$ скорость вращения вала $\Delta U_{\text{вх}}$ начинает расти. Под действием возросшей центробежной силы расходятся грузы 2, преодолевая силу пружины 3 чувствительного элемента регулятора, муфта 4 регулятора поднимается кверху из положения A в положение A' и игла 1 опускается вниз из положения C в положение C' . Уменьшается подача топлива в двигатель и снижается скорость вращения вала двигателя. Таким образом, регулятор противодействует изменению регулируемой величины — скорости вращения и стремится стабилизировать ее значение.

Эти регуляторы до сих пор применяются в промышленности. Регуляторы уровня воды применяются сейчас в автомобильных карбюраторах. Центробежные регуляторы скорости вращения имеются в автомобильных дизельных двигателях, паровых турбинах, двигателях реактивных самолетов. Они предназначены для стабилизации режима работы.

2.3. Функциональная схема систем автоматического управления

Разделение САУ на отдельные элементы целесообразно, так как это позволяет более экономично осуществлять разработку САУ и ее анализ. Разделение позволяет определить функциональную сущность отдельных элементов САУ, и представляется возможность построить функциональную схему САУ. Из приведенного ниже примера очевидно, что устройство управления для поддержки состояния объекта на требуемом уровне выполняет следующие функции [5]:

- 1) измерение значения контролируемых параметров датчика;
- 2) преобразование — усиление сигнала;
- 3) сравнение с заданным значением;
- 4) индицирование, усиление;
- 5) принятие решения и использование.

Из этого можно получить функциональную схему САУ (рис. 2.6).

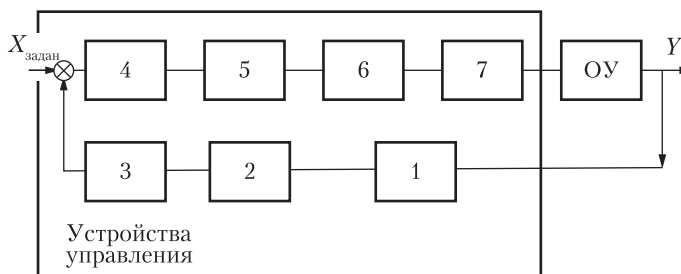


Рис. 2.6. Функциональная схема САУ:

- 1 — датчик; 2 — преобразующе-усиливающие устройства;
- 3 — сравнивающий элемент; 4 — усилитель; 5 — усиливающее-преобразующие устройства; 6 — исполнительный механизм; 7 — регулирующий орган

2.4. Классификация систем автоматического управления

Сложность современных автоматических систем не позволяет осуществить их однозначную классификацию, так как

ряд классификационных признаков оказывается присущим САУ различных типов.

1. САУ по цепи передачи сигналов могут быть замкнутыми или разомкнутыми (рис. 2.7).

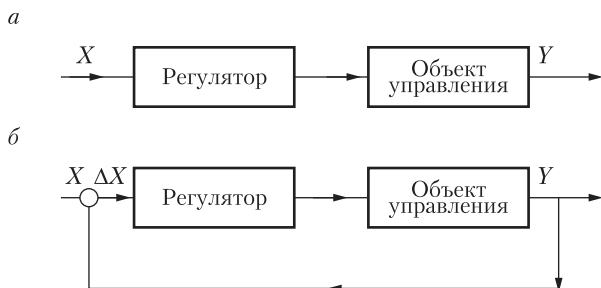


Рис. 2.7. Функциональные схемы САУ:
а — разомкнутой; б — замкнутой

В замкнутых САУ в процессе функционирования непрерывно или через определенные промежутки времени на суммирующее устройство поступают сигналы, определяющие величину регулируемого параметра, а в разомкнутых САУ такая информация отсутствует. Примером разомкнутых САУ могут быть системы автоматических турникетов, система обеспечения заданного теплового режима в помещении в зависимости от температуры наружного воздуха и т.д.

2. По характеру управляющего воздействия САУ подразделяются:

- на системы автоматической стабилизации (САС);
- системы программного управления (СПУ);
- следящие системы (СС).

В САС управляющее (входное) воздействие не изменяется во времени, т.е. $x_{\text{вх}} = \text{const}$. Такая система обрабатывает возникающие отклонения регулируемой величины от заданного. Именно такое регулирование обеспечивается в САУ.

В СПУ управляющее (входное) воздействие изменяется во времени по заданному закону. Такие системы применяются для управления процессами, характер протекания которых известен.

В СС характер изменения управляющего воздействия определяется процессами, происходящими вне системы, и он не может быть определен. Следящие системы используются для отработки возмущений, характер которых неизвестен заранее.

3. По характеру математического описания статистических и динамических режимов САУ подразделяются на линейные и нелинейные.

Линейные САУ описываются в статике линейными алгебраическими уравнениями, а в динамике — линейными дифференциальными уравнениями. Один из характерных признаков линейных САУ — проявление принципа суперпозиции, заключающегося в том, что реакция линейной системы на несколько воздействий равна сумме реакций на каждое из воздействий в отдельности.

Нелинейные САУ описываются нелинейными уравнениями. Реальные системы относятся к типу нелинейных, однако теория линейных систем в значительной степени создает предпосылки для разработки теории нелинейных САУ.

4. По характеру связи между входной и выходной величинами САУ подразделяются на непрерывные и прерывистые (дискретные, импульсные и релейные).

В непрерывных САУ между выходными и входными величинами существует непрерывная функциональная зависимость.

В прерывистых САУ непрерывному изменению регулируемого параметра соответствует выходная величина в виде:

- последовательности импульсов, амплитуды, длительности и частоты повторений, которые зависят от значения входной величины и характера импульсного элемента;
- скачкообразного сигнала, который появляется лишь при определенных значениях входной величины.

5. По числу регулируемых переменных САУ подразделяются на одномерные (с одной регулируемой величиной) и многомерные (с несколькими регулируемыми величинами).

Многомерные САУ подразделяются на системы несвязанного и связанного регулирования. В многомерных системах несвязанного регулирования различные регулируемые величины не имеют взаимной связи. В многомерных системах связанного регулирования регуляторы различных переменных взаимосвязаны между собой и через общий объект

регулирования. Примером многомерной САУ может служить САУ работы парового котла, в которой осуществляется регулирование подачи воды, топлива и воздуха в форсунки.

6. По числу обратных связей САУ подразделяются на одноконтурные и многоконтурные.

Одноконтурные САУ имеют одну обратную связь — жесткую, главную отрицательную обратную связь, охватывающую всю систему от входа до выхода.

Многоконтурные системы помимо главной жесткой отрицательной обратной связи имеют еще местные обратные связи, как жесткие, так и гибкие, как отрицательные, так и положительные, охватывающие часть системы.

7. По величине ошибки в установившемся состоянии САУ подразделяются на статические и астатические.

В статических САУ в установившихся режимах имеет место отклонение регулируемой величины от заданного значения.

Астатическими называют САУ, обеспечивающие регулирование без статической ошибки.

8. По назначению САУ подразделяются:

- на системы с поиском экстремума показателя качества;
- системы оптимального управления;
- адаптивные системы.

9. По зависимости времени состояния объекта выделяют САУ:

- статические (статика, безынерционные);
- динамические (инерционные).

10. По изменению величины параметра по времени САУ подразделяется:

- на стационарные;
- нестационарные.

11. В зависимости от источника энергии САУ бывают:

- электрические;
- пневматические;
- гидравлические и т.д.

12. По способу воздействия измерительного элемента на регулирующий элемент различают:

- САУ прямого действия;
- САУ непрямого действия.

13. В зависимости от вида регулируемого параметра выделяют:

- САУ температуры;
- САУ давления;
- САУ уровня влажности и т.д.

Помимо перечисленных возможны и другие признаки классификации.

2.5. Основные принципы управления

В процессе работы объект управления подвержен воздействию различных внешних возмущений, вследствие чего управляемая величина отклоняется от требуемого значения. Задачей устройства управления является обеспечение соответствия управляемой величины заданному значению путем передачи на объект управления необходимого управляющего воздействия.

По способу определения управляющего воздействия, необходимого для компенсации отклонения управляемой величины от требуемого значения, различают три принципа управления:

- управление по возмущению, когда управляющее воздействие на объект формируется в зависимости от величины задающего воздействия и одного или нескольких внешних воздействий на ОУ;
- управление по отклонению, когда управляющее воздействие на объект формируется в зависимости отклонения действительного значения управляемой координаты от заданного значения;
- комбинированное управление, когда управляющее воздействие на объект формируется в зависимости отклонения действительного значения управляемой координаты от заданного значения и величины одного или нескольких внешних воздействий на ОУ.

Рассмотрим их более подробно.

2.5.1. Принцип управления по возмущению

Управление по возмущению основано на принципе компенсации возмущений и является первым принципом автоматического управления. При таком принципе управления управляемый параметр не изменяется, а используется только информация о внешнем воздействии $f(t)$. При этом определяют основное возмущающее воздействие и устанавливают, как необходимо изменять управляющее воздействие на объект управления, чтобы значение управляемых параметров под-

держивать неизменным. Функциональная схема такой САУ представлена на рис. 2.8.

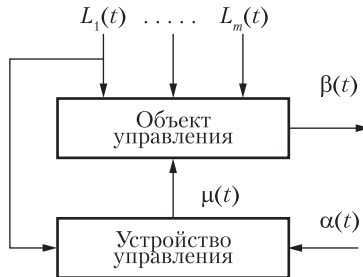


Рис. 2.8. Структура САУ, построенной на базе принципа управления по возмущению

В САУ, использующей принцип управления по возмущению, управляющее воздействие на объект определяется как

$$\mu(t) = F(\alpha(t), L(t)).$$

Принцип управления по возмущению заключается в том, что для устранения отклонения вектора выходных параметров от требуемого значения, вызываемого возмущающим воздействием, измеренная величина этого возмущения преобразуется в управляющее воздействие, которое, будучи приложенным к ОУ, вызывает компенсирующее отклонение управляемой величины противоположного знака по сравнению с отклонением, вызываемым возмущающим воздействием.

Для определения основных закономерностей, присущих САУ, построенных на базе этого принципа, рассмотрим систему, структурная схема которой представлена на рис. 2.9.

В САУ, использующую принцип отклонения по возмущению, входят следующие элементы:

- задающее устройство (ЗУ), необходимое для реализации алгоритма работы объекта управления, выражающегося в формировании управляющего воздействия $\alpha(t)$;
- измерительный преобразователь (ИП), обеспечивающий измерение выбранного возмущения на объект управления;
- функциональный преобразователь (П), формирующий необходимую по условиям работы САУ статическую характеристику тракта измерения;

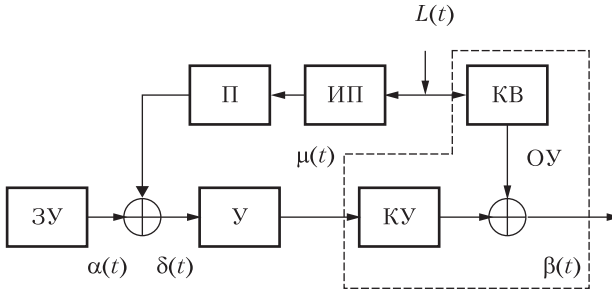


Рис. 2.9. Структурная схема САУ, построенной на базе принципа управления по возмущению

- промежуточный усилитель (У), обеспечивающий формирование требуемого закона управления ОУ;
- объект управления (ОУ).

Рассмотрим условия работы этой системы. Для этого определим взаимосвязи между входными и выходными сигналами каждого блока.

Объект управления характеризуется уравнением вида

$$\beta = K_1 \mu - K_2 L.$$

Канал измерения возмущения может быть представлен выражением вида

$$L_1 = K_3 L.$$

Узел суммирования сигналов представляется выражением вида

$$\delta = \alpha + L_1 = \alpha + K_3 L.$$

Управляющее воздействие на объект может быть представлено как

$$\mu_1 = K_4 \delta = K_4 (\alpha + K_3 L).$$

С учетом этих уравнений сигнал на выходе ОУ определяется как

$$\beta = K_1 K_4 (\alpha + K_3 L) - K_2 L = K_1 K_4 \cdot \alpha + (K_1 K_3 K_4 - K_2) L.$$

Очевидно, что при $(K_1 K_3 K_4 - K_2) = 0$ влияние внешнего возмущения на выходную координату САУ будет равно нулю. Условие полной компенсации влияния внешнего возмущения определяется как

$$K_{3;0} = \frac{K_2}{K_1 K_4}.$$

На рис. 2.10 приведены внешние характеристики САУ с различной степенью компенсации управляющего воздействия.

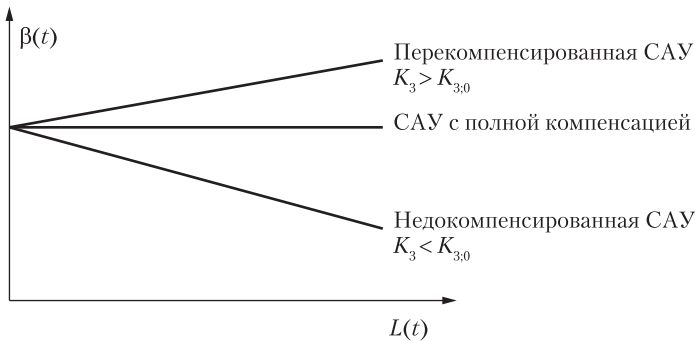


Рис. 2.10. Статические характеристики САУ

Если на ОУ действует несколько возмущений L, L_1, L_2, \dots, L_m , то уравнение объекта принимает вид

$$\beta = K_1 \mu - \left(K_2 L - \sum_{i=1}^m K_{2i} L_i \right).$$

С учетом действия САУ сигнал на выходе объекта управления определяется как

$$\beta = K_1 K_4 \alpha + L (K_1 K_3 K_4 - K_2) - \sum_{i=1}^m K_{2i} L_i.$$

При $K_3 = K_{3;0}$ получаем, что

$$\beta = K_1 K_4 \alpha - \sum_{i=1}^m K_{2i} L_i.$$

Очевидно, что использование принципа управления по возмущению обеспечивает компенсацию влияния только измеряемых внешних возмущений.

Преимущества такого способа управления:

- возможность полной компенсации возмущающего воздействия на объект управления;
- отсутствие информации о подлинном состоянии объекта управления устраняет проблему обеспечения устойчивости управления.

Недостатки:

- устранение влияния лишь тех возмущающих воздействий, для которых созданы компенсационные каналы обработки величин этих воздействий;
- наличие большого числа неконтролируемых возмущений увеличивает погрешность стабилизации выходной координаты;
- изменение условий компенсации влияния внешних возмущений на объект при изменении его параметров, возникающих при изменении условий работы объекта управления и регулятора;
- возможность применения управления только к объектам, качественные и количественные характеристики которых известны.

Одним из способов реализации принципа управления по возмущению является принцип управления по управляющему воздействию (управлению). Ведь если рассмотреть объект управления, то как управляющее, так и возмущающее воздействия являются внешними по отношению к самому объекту управления.

2.5.2. Принцип управления по отклонению

Более высокое качество управления позволяют получить замкнутые САУ, в которых используется информация об управляемом параметре (рис. 2.11). В таких системах измеряется значение управляемого параметра. Устройство управления производит сравнение полученного сигнала с заданным значением и при наличии разности вырабатывается управляющее воздействие, направленное на уменьшение полученной величины рассогласования заданного и измеренного значений параметров. При этом устройство управления стремится компенсировать это отклонение независимо от причин, его вызывающих.

Данный принцип управления иногда называют компенсационным принципом Ползунова — Уатта. Такой способ управления является основным для большинства современных САУ.

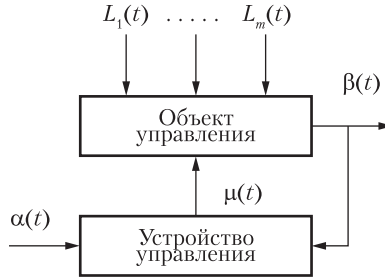


Рис. 2.11. Функциональная схема САУ, построенной на базе принципа управления по отклонению

В САУ, использующей принцип управления по отклонению, управляющее воздействие на объект определяется как

$$\mu(t) = F\{\alpha(t), \beta(t)\}.$$

Рассмотрим систему автоматического управления с обратной связью, структурная схема которой представлена на рис. 2.12.

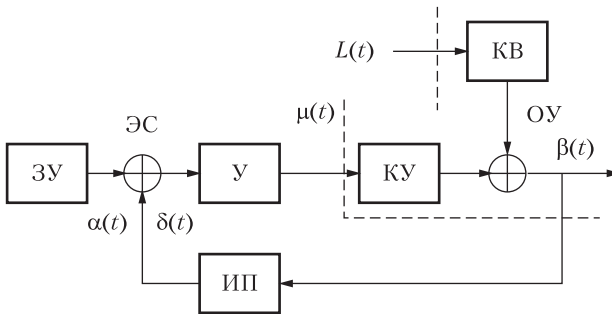


Рис. 2.12. Структурная схема САУ, построенной на базе принципа управления по отклонению

В САУ, использующей такой принцип управления, входят следующие основные элементы:

- задающее устройство (ЗУ), необходимое для реализации алгоритма работы объекта управления, выражающегося в формировании управляющего воздействия $\alpha(t)$;

- измерительный преобразователь (ИП), обеспечивающий измерение управляемой координаты;
- элемент сравнения (ЭС), выявляющий отклонение $\delta(t)$ управляемой координаты $\beta(t)$ от ее требуемого значения;
- промежуточный усилитель (У), обеспечивающий формирование требуемого закона управления ОУ;
- объект управления (ОУ).

Принцип работы САУ заключается в измерении управляемой координаты $\beta(t)$ с помощью ИП и сравнении полученного сигнала с задающим $\alpha(t)$. Элемент сравнения выявляет разность этих сигналов, представляющую собой ошибку управления. Этот сигнал используется для формирования управляющего воздействия на ОУ $\mu(t)$. Очевидно, что выходная координата является функцией как задающего сигнала $\alpha(t)$, так и своего собственного значения. То есть

$$\beta(t) = F\{\alpha(t), \beta(t)\}.$$

Первая составляющая выходного сигнала формируется по прямому каналу управления, а вторая — по каналу с обратным направлением передачи информации, называемому каналом обратной связи или просто обратной связью. Так как такая связь обеспечивается элементом сравнения, вычисляющим разность сигналов задания и обратной связи, то такой вид обратной связи называется отрицательной. Если сигнал обратной связи определяется алгебраическим суммированием сигналов задания и обратной связи, то такая связь называется положительной.

Поэтому такой принцип управления называется управлением с обратной связью. Так как в такой САУ присутствует замкнутый контур для прохождения информации, то такие системы называют замкнутыми САУ.

Замкнутой САУ называют систему, в которой процесс управления ОУ зависит от результата управления.

Системы, которые непосредственно не используют конечные результаты управления объектом, называют разомкнутыми. Следовательно, САУ, построенные с использованием принципа управления по возмущению, являются разомкнутыми.

Рассмотрим особенности замкнутых САУ.

Объект управления характеризуется уравнением вида

$$\beta = K_1\mu - K_2L.$$

При отсутствии управления при изменении возмущающего воздействия на ОУ на его выходе появляется отклонение управляемого сигнала от требуемого значения. Это отклонение является ошибкой управления $\Delta\beta_p$ при отсутствии обратной связи, т.е. в разомкнутой системе. Его величина определяется как

$$\Delta\beta_p = K_2 L.$$

Канал измерения сигнала обратной связи может быть представлен выражением вида

$$\beta_1 = K_3 \beta.$$

Элемент сравнения сигналов представляется выражением вида

$$\delta = \alpha - \beta_1 = \alpha - K_3 \beta.$$

Управляющее воздействие на объект может быть представлено как

$$\mu = K_4 \delta = K_4 (\alpha - K_3 \beta).$$

С учетом этих уравнений сигнал на выходе объекта управления определяется как

$$\beta = K_1 K_4 (\alpha - K_3 \beta) - K_2 L = K_1 K_4 \alpha - K_1 K_4 K_3 \beta - K_2 L.$$

Решая это уравнение относительно управляемой координаты ОУ, получаем

$$\beta = \frac{K_1 K_4 \alpha - K_2 L}{1 + K_1 K_3 K_4} = \frac{K_1 K_4}{1 + K_1 K_3 K_4} \alpha - \frac{K_2}{1 + K_1 K_3 K_4} L.$$

Учитывая, что $\Delta\beta_p = K_2 L$, получаем

$$\beta = \frac{K_1 K_4}{1 + K_1 K_3 K_4} \alpha - \frac{\Delta\beta_p}{1 + K_1 K_3 K_4} = \beta_T - \Delta\beta_Z,$$

где β_T — заданное значение управляемой координаты;

$$\Delta\beta_Z = \frac{\Delta\beta_p}{1 + K_1 K_3 K_4} = \frac{\Delta\beta_p}{1 + K_\Sigma} \quad \text{— ошибка управления в замкну-$$

той САУ; $K_\Sigma = K_1 K_3 K_4$ — суммарный коэффициент передачи замкнутого контура управления.

Очевидно, что при достаточно большом коэффициенте передачи замкнутого контура управления $K_\Sigma \gg 1$ ошибка управления в замкнутой системе будет много меньше, чем в разомкнутой. То есть справедливо соотношение

$$\Delta\beta_z \ll \Delta\beta_p.$$

Статические характеристики разомкнутой и замкнутой САУ представлены на рис. 2.13.

Полученное выражение является базовым для определения свойств и параметров замкнутой САУ. Действительно, если известен суммарный коэффициент усиления замкнутой САУ и ее свойства ОУ, то возможно определение ошибки в замкнутой системе. И наоборот, если задана величина ошибки САУ, возможно определение требуемого суммарного коэффициента передачи с помощью следующего неравенства:

$$K_\Sigma > \frac{\Delta\beta_p}{\Delta\beta_z} - 1.$$

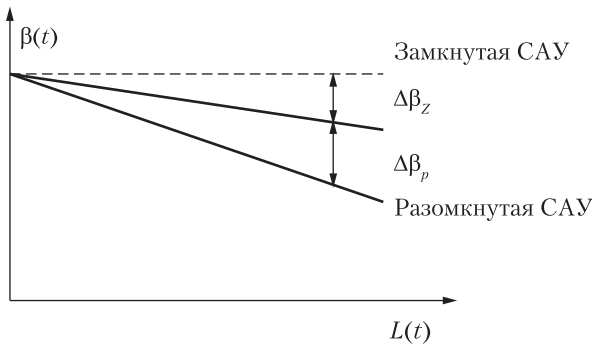


Рис. 2.13. Статические характеристики САУ с обратной связью

Очевидно, что при воздействии на объект нескольких возмущающих факторов свойства уменьшения ошибки управления сохраняются. Действительно, если ОУ представляется выражением вида

$$\beta = K_1\mu - \sum_{i=1}^m K_{2i}L_i,$$

то сигнал на выходе объекта определяется как

$$\beta = \frac{K_1K_4\alpha - \sum_{i=1}^m K_{2i}L_i}{1 + K_1K_3K_4} = \frac{K_1K_4}{1 + K_1K_3K_4} \alpha - \sum_{i=1}^m \frac{K_{2i}}{1 + K_1K_3K_4} L_i.$$

Поскольку $K_{2i}L_i = \Delta\beta_{pi}$ является ошибкой разомкнутой САУ относительно выбранного возмущающего фактора, то выходная координаты ОУ определяется как

$$\beta = \beta T - \sum_{i=1}^m \frac{\Delta\beta_{pi}}{1 + K_{\Sigma}}$$

Следовательно, суммарная ошибка управления в замкнутой САУ определяется как

$$\Delta\beta_Z - \sum_{i=1}^m \frac{\Delta\beta_{pi}}{1 + K_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^m \Delta\beta_{2i}$$

Преимущества такого способа управления:

- большая гибкость и приспособляемость к различным условиям эксплуатации САУ;
- возможность уменьшения влияния любых внешних возмущений на объект управления;
- малая чувствительность к изменению параметров регулятора и объекта управления.

Недостатки:

- невозможность полного устранения влияния возмущающих воздействий на величину вектора выходных состояний объекта управления;
- возникновение проблем с устойчивостью САУ при попытках увеличения коэффициента усиления системы.

2.5.3. Комбинированный принцип управления

Совместное использование принципов управления по возмущению и отклонению называется принципом комбинированного управления. В использующих такой принцип управления САУ принцип управления по отклонению реализуется с помощью обратной связи, а принцип управления по возмущению — с помощью компенсирующих связей. Структура такой системы представлена на рис. 2.14.

При использовании принципа комбинированного управления управляющее воздействие на ОУ определяется как

$$\mu(t) = F\{\alpha(t) \beta(t) L(t)\}.$$

Рассмотрим основные особенности работы такой САУ. Если на ОУ действует несколько возмущений L, L_1, L_2, \dots, L_m , то уравнение объекта принимает вид

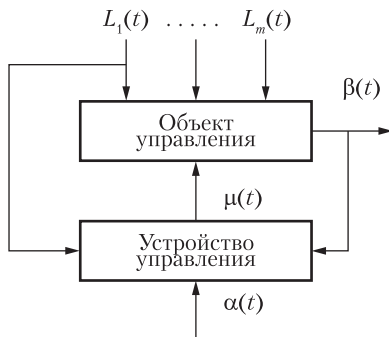


Рис. 2.14. Структура САУ, построенной на базе комбинированного принципа управления

$$\beta = K_1 \mu - \left(K_2 L - \sum_{i=1}^m K_{2i} L_i \right).$$

С учетом действия САУ сигнал на выходе объекта управления определяется как

$$\beta = K_1 K_4 \alpha - \beta K_1 K_5 K_4 + L (K_1 K_3 K_4 - K_2) - \sum_{i=1}^m K_{2i} L_i,$$

где K_5 — коэффициент передачи ИП.

Решая это уравнение относительно управляемой координаты, получаем

$$\beta = \frac{K_1 K_4}{1 + K_\Sigma} \alpha + \frac{K_1 K_3 K_4 - K_2}{1 + K_\Sigma} L - \frac{\sum_{i=1}^m K_{2i} L_i}{1 + K_\Sigma},$$

где $K_\Sigma = K_1 K_4 K_5$ — суммарный коэффициент передачи замкнутого контура управления.

При оптимальной настройке компенсационной связи $K_3 = K_{3,0}$. Тогда получаем, что

$$\beta = \beta_T - \frac{\sum_{i=1}^m K_{2i} L_i}{1 + K_\Sigma} = \beta_T - \frac{\sum_{i=1}^m \Delta \beta_{2i}}{1 + K_\Sigma},$$

где $\Delta\beta_{2i}$ — ошибка разомкнутой САУ относительно выбранного возмущающего воздействия.

При отклонении значения коэффициента компенсационной связи от оптимального на величину ΔK_3 получаем, что управляемая координата β определяется как

$$\beta = \beta_T + \frac{\Delta K_1 K_3 K_4 L}{1 + K_\Sigma} - \frac{\sum_{i=1}^m \Delta\beta_{2i}}{1 + K_\Sigma}.$$

Преимущества такого способа управления:

- полная компенсация ошибок управления, вызываемых основными возмущающими факторами;
- уменьшение ошибок управления, вызываемых неизменяемыми возмущающими факторами;
- меньшая чувствительность к изменению параметров по сравнению с разомкнутыми САУ;
- менее жесткие требования к величине коэффициента передачи замкнутой САУ, что снижает проблему обеспечения устойчивости системы.

Недостатки:

- конструктивная сложность САУ, связанная с наличием большого числа каналов управления;
- сложность настройки САУ, обусловленная теми же причинами.

Глава 3

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

3.1. Измерение технологических параметров

Важным элементом системы управления являются датчики параметров функциональных подсистем и параметров обрабатываемых изделий. Разнообразие физико-термических процессов, реализуемых в оборудовании, трудности измерения параметров создаваемых полупроводниковых структур делают задачу измерения весьма сложной [3].

Основной тенденцией развития измерительной техники является системное объединение и использование средств измерения. Объединение средств измерения в единую измерительную систему позволяет существенно повысить эффективность измерительного эксперимента, выполнять его по заданной программе с проведением математической обработки информации в ходе эксперимента. Построение таких систем для решения конкретной задачи экономически не всегда оправдано в основном из-за сложностей сопряжения отдельных приборов. Экономически нецелесообразно создание универсальных измерительных систем, способных решать широкий класс задач. Такие системы обладали бы большой аппаратурной избыточностью.

Выход был найден в создании Государственной системы приборов (ГСП). Государственная система приборов

предусматривает создание научно обоснованных рядов приборов и устройств с унифицированными характеристиками и конструктивным выполнением. Устройства ГСП, предназначенные для решения определенных измерительных задач, объединяются в агрегатные комплексы. Изделия, входящие в агрегатные комплексы, должны легко сопрягаться друг с другом, не оказывать взаимного влияния, иметь одинаковые условия эксплуатации. Для этого они должны обладать совместимостью. Различают пять видов совместимости изделий агрегатных комплексов: энергетическую, метрологическую, конструктивную, эксплуатационную и информационную.

Энергетическая совместимость предполагает выбор одного рода энергии носителя сигнала.

Метрологическая совместимость обеспечивает сопоставимость метрологических характеристик агрегатных средств и их сохранность во времени, возможность расчетного определения метрологических характеристик ИИС по метрологическим характеристикам отдельных узлов.

Конструктивная совместимость обеспечивает согласованность конструктивных параметров. Для этого нормируются элементы конструкций, установочные размеры, стиль выполнения оформления.

Эксплуатационная совместимость обеспечивается согласованностью характеристик. Для этого все средства делятся на группы по использованию в зависимости от условий окружающей среды, климатических и механических воздействий и т.д.

Информационная совместимость средств обеспечивает согласованность входных и выходных сигналов по виду, диапазону изменения, порядку обмена сигналами. Информационная совместимость определяется унификацией измерительных сигналов и применением стандартных интерфейсов. Унификация измерительных сигналов означает, что их параметры не могут выбираться произвольно, а должны отвечать требованиям стандарта на эти сигналы.

В измерительной системе, созданной на базе стандартной системы сопряжения, могут быть выделены следующие группы функциональных устройств:

а) устройства-источники, способные только передавать цифровую информацию в другие приборы системы, например фотосчитывающее устройство;

б) устройства-приемники, способные только принимать цифровую информацию от других устройств системы, например генератор сигналов, управляемый кодом, перфоратор, цифроречевое устройство;

в) устройства-источники приемники, способные и принимать, и передавать информацию, например цифровой вольтметр, который принимает команды на переключение диапазона и выдает код результата измерения;

г) устройства-контроллеры, служащие для управления системой.

Простые системы могут не содержать контроллера как отдельного устройства. В этом случае его функции выполняются устройствами, входящими в систему. Для передачи информации между устройствами применяются линии интерфейса.

Структура информационно-измерительной системы зависит от принятого в системе способа управления — децентрализованного или централизованного.

ГСП объединяет в себе все средства контроля и регулирования технологических процессов. Характерной особенностью ГСП являются:

- блочно-модульный принцип, лежащий в основе конструкций устройств;
- унификация входных-выходных сигналов и сигналов питания.

ГСП содержит три ветви:

- 1) гидравлическую,
- 2) пневматическую,
- 3) электрическую.

Блочно-модульный принцип характеризуется наличием отдельных модулей или блоков, выполняющих достаточно простую функцию. Этот принцип позволяет уменьшить номенклатуру средств автоматизации, упрощает ремонт и замену, уменьшает стоимость, позволяет реализовать принцип взаимозаменяемости.

Основные виды унифицированных входных сигналов ГСП приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Унифицированные сигналы

| Вид сигнала | Физическая величина | Параметры сигнала |
|----------------|-----------------------|---|
| Электрический | Постоянный ток | 0–5, 0–20, –5–0–5, 4–20 мА |
| | Постоянное напряжение | 0–10, 0–20–10–0–10 мВ; 0–10, 0–1–1–0–1 В |
| | Переменное напряжение | 0–2, –1–0–1 В |
| | Частота | 2–8, 2–4 кГц |
| Пневматический | Давление | 20–100 МПа |
| Гидравлический | Давление | 0,1–6,4 МПа |

Первичные приборы (датчики) могут преобразовывать измеряемый параметр в какой-либо унифицированный сигнал. Если же датчик выдает неунифицированный сигнал, то для приведения его к стандартному диапазону должен быть установлен соответствующий преобразователь.

3.2. Основные определения

Прямое измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных.

Косвенное измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят на основании зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

Принцип измерений — совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Метод измерений — совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Средство измерений — техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информа-

ции в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Аналоговый измерительный прибор — измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины.

Цифровой измерительный прибор — измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

Показывающий измерительный прибор — измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний.

Показания средства измерений — измерение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины.

Градуировочная характеристика средства измерений — зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы.

Диапазон показаний — область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы.

Диапазон измерений — область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений.

Предел измерений — наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений.

Чувствительность измерительного прибора — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

Любые измерения сопровождаются следующими погрешностями:

- случайные погрешности — имеют случайную природу и причина их неизвестна;
- промахи — вызваны неправильными отсчетами по прибору;
- систематические — обусловлены несовершенством методов определения, конструкции прибора.

Виды погрешностей:

1) абсолютные:

$$\Delta X = X - X_0,$$

где X — измеренное значение параметра; X_0 — истинное значение.

Абсолютная погрешность измерения — погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины;

2) относительные:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100\%.$$

Относительная погрешность измерения — отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины. Относительная погрешность может быть выражена в процентах;

3) приведенные:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot 100\%,$$

где X_{\min} и X_{\max} — минимальное и максимальное значения измеряемой величины.

Максимальная приведенная погрешность называется классом точности:

$$\gamma = \frac{\Delta X_{\max}}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot 100\%.$$

В зависимости от класса точности приборы делятся на эталонные (образцовые) и рабочие.

3.3. Классификация контрольно-измерительных приборов

На предприятиях микроэлектроники наиболее часто измеряемыми величинами являются температура, давление, расход и уровень. На них приходится около 80% всех измерений. Остальную часть занимают электрические, оптические и другие измерения.

При измерениях используются различные измерительные приборы, которые классифицируются по ряду признаков. Общей градацией является разделение их на приборы для измерения: механических, электрических, магнитных, тепловых и других физических величин.

Классификация по роду измеряемой величины указывает, какую физическую величину измеряет прибор (давление P , температуру T , расход F , уровень L , количество вещества Q и т.д.).

Исходя из признака преобразования измеряемой величины измерительные приборы разделяют на приборы:

- непосредственной оценки;

- сравнения.

По характеру измерения:

- стационарные;
- переносные.

По способу отсчета измеряемой величины:

- показывающие;
- регистрирующие;
- суммирующие.

3.4. Виды первичных преобразователей

Первичные приборы или первичные преобразователи предназначены для непосредственного преобразования измеряемой величины в другую величину, удобную для измерения или использования. Различают следующие виды преобразователей:

- генераторные — осуществляют преобразование различных видов энергии в электрическую, т.е. они генерируют электрическую энергию (термоэлектрические, пьезоэлектрические, электрокинетические, гальванические и другие датчики);
- параметрические — к ним относятся реостатные, тензодатчики, термосопротивления и т.п. Для их работы необходим источник энергии;
- механические — выходным сигналом механических первичных преобразователей (мембранных, манометров, дифманометров, ротаметров и др.) является усилие, развиваемое чувствительным элементом под действием измеряемой величины.

3.5. Методы и приборы для измерения температуры

Температура вещества — величина, характеризующая степень нагретости, которая определяется внутренней кинетической энергией теплового движения молекул. Измерение температуры практически возможно только методом сравнения степени нагретости двух тел.

Для сравнения нагретости этих тел используют изменения каких-либо физических свойств, зависящих от температуры и легко поддающихся измерению.

По свойству термодинамического тела, используемого для измерения температуры, можно выделить следующие типы термометров:

- термометры расширения, основанные на свойстве температурного расширения жидких тел;
- термометры расширения, основанные на свойстве температурного расширения твердых тел;
- термометры газовые манометрические;
- термометры жидкостные манометрические;
- термометры конденсационные;
- термометры электрические;
- термометры сопротивления;
- оптические монохроматические пирометры;
- оптические цветковые пирометры;
- радиационные пирометры.

3.5.1. Термометры расширения (жидкостные стеклянные)

Тепловое расширение жидкости характеризуется сравнительным коэффициентом объемного расширения, значение которого определяется как

$$\beta_{t_1, t_2} = \frac{V_{t_1} - V_{t_2}}{V_0(t_2 - t_1)}, [1/\text{град}],$$

где V_0, V_{t_1}, V_{t_2} – объемы жидкости при 0°C , температурах t_1 и t_2 соответственно.

Чувствительность термометра зависит от разности коэффициентов объемного расширения термометрической жидкости и стекла, от объема резервуара и диаметра капилляра. Чувствительность термометра обычно лежит в пределах $0,4\text{--}5 \text{ мм}/^\circ\text{C}$ (для некоторых специальных термометров $100\text{--}200 \text{ мм}/^\circ\text{C}$).

Для защиты от повреждений технические термометры монтируются в металлической оправе, а нижняя погружная часть закрывается металлической гильзой.

3.5.2. Термометры, основанные на расширении твердых тел

К этой группе приборов относятся dilatометрические и биметаллические термометры, основанные на изменении линейных размеров твердых тел с изменением температуры.

Конструктивное исполнение дилатометрических термометров основано на преобразовании измеряемой температуры в разность абсолютных значений удлинений двух стержней, изготовленных из материалов с существенно различными термическими коэффициентами линейного расширения:

$$\beta_{t_1, t_2} = \frac{l_{t_1} - l_{t_2}}{l_0(t_2 - t_1)}, [1/\text{град}],$$

где l_0 , l_{t_1} , l_{t_2} — линейные размеры тела при 0°C , температурах t_1 и t_2 соответственно.

В силу того что $\Delta\beta$ мала, дилатометрические термометры применяются в качестве различного рода тепловых реле в устройствах сигнализации и регулирования температуры.

Биметаллические термометры основаны на деформации биметаллической ленты при изменении температуры. Обычно применяются биметаллические ленты, согнутые в виде плоской или винтовой спирали. Один конец спирали укреплен неподвижно, второй — на оси стрелки. Угол поворота стрелки равен углу закручивания спирали, который пропорционален изменению температуры.

Биметаллические термометры обеспечивают измерение температуры с относительными погрешностями 1–1,5%.

3.5.3. Газовые и жидкостные манометрические термометры

В основу принципа действия манометрического термометра положена зависимость между температурой и давлением термометрического (рабочего) вещества, лишенного возможности свободно расширяться при нагревании.

Манометрические термометры обычно включают в себя термобаллон, капиллярную трубку и трубчатую пружину с поводком, зубчатым сектором и стрелкой. Вся система заполняется рабочим веществом. При нагревании термобаллона, установленного в зоне измеряемой температуры, давление рабочего вещества внутри замкнутой системы увеличивается. Увеличение давления воспринимается манометрической пружиной, которая воздействует через передаточный механизм на стрелку или перо прибора.

Газовые манометрические термометры основаны на зависимости между температурой и давлением газа, заключенного в герметически замкнутой термосистеме.

Достоинства: шкала прибора практически равномерна.

Недостатки: сравнительно большая инерционность и большие размеры термобаллона.

В качестве манометрической жидкости в приборах этого типа применяются метиловый спирт, ксилол, толуол, ртуть и т.д.

Жидкостные манометрические термометры имеют равномерную шкалу.

3.5.4. Конденсационные манометрические термометры

Конденсационные манометрические термометры реализуют зависимость упругости насыщенных паров низкокипящей жидкости от температуры. Поскольку эти зависимости для используемых жидкостей (хлористый метил, этиловый эфир, хлористый этил, ацетон и др.) нелинейны, следовательно, и шкалы термометров неравномерны. Однако эти приборы обладают более высокой чувствительностью, чем газовые жидкостные.

3.5.5. Электрические термометры

Принцип действия этого типа термометров основан на зависимости термо-ЭДС (ТЭДС) цепи от изменения температуры (рис. 3.1).

В термоэлектрической цепи, состоящей из двух проводников A и B (см. рис. 3.1), возникают четыре различных ТЭДС: две ТЭДС в местах спаев проводников A и B , ТЭДС на конце проводника A и ТЭДС на конце проводника B . Суммарная ТЭДС, возникающая при нагреве спаев проводников до температур t и t_0 ,

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0),$$

где e_{AB} и e_{BA} — ТЭДС, обусловленная контактной разностью потенциалов и разностью температур концов A и B .

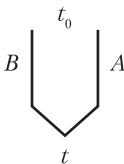


Рис. 3.1. Термопара

ТЭДС $E_{AB}(tt_0)$ является функцией от температуры горячего спая t при условии постоянства температуры холодного спая t_0 .

Термопары градуируются при определенной постоянной температуре t_0 (обычно $t_0 = 0$ или 20°C). При измерениях температура t_0 может отличаться

от градуировочного значения. В этом случае вводится соответствующая поправка в результат измерения:

$$E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt'_0) + E_{AB}(t'_0t_0).$$

Поправка $E_{AB}(t'_0t_0)$ равна ТЭДС, которую развивает данная термопара при температуре горячего спаев t'_0 и градуировочном значении температуры холодных спаев. Поправка берется положительной, если $t'_0 > t_0$, и отрицательной, если $t'_0 < t_0$.

Величина поправки может быть взята из градуировочной таблицы.

Конструктивное исполнение термопар разнообразно и зависит главным образом от условий их применения. При необходимости измерения небольшой разницы температур или получения большой ТЭДС применяются дифференциальные термопары и термобатареи, представляющие собой несколько последовательно соединенных термопар.

Рассмотрим *компенсацию* изменения температуры холодных спаев термопар. Правильное измерение температуры возможно лишь при постоянстве температур свободных спаев t_0 . Оно обеспечивается с помощью соединительных проводов и специальных термостатирующих устройств. Соединительные провода в данном случае предназначены для переноса свободных концов термопары в зону с известной постоянной температурой, а также для подсоединения свободных концов термопары к зажимам измерительных приборов. Соединительные провода должны быть термоэлектрически подобны термоэлектродам термопары.

Как правило, соединительные провода для термопар, изготовленных из благородных металлов, выполняются из тех же самых материалов, что и термоэлектроды. Материалы термопар представлены в табл. 3.2. Исключение составляет хромель-алюмелевая термопара, для которой с целью уменьшения сопротивления линии в качестве соединительных проводов применяется медь в паре с константаном.

Градуировки термопар: ХА — хромель-алюмелевые (по международной классификации — градуировка К); ХК — хромель-копелевые (L); ПП — платинородий-платиновые (S) и др. Градуировочные характеристики приведены на рис. 3.2.

Требования к термопарам:

- воспроизводимость;
- высокая чувствительность;
- надежность;

- стабильность;
- достаточный температурный диапазон.

Таблица 3.2

Материалы термопар

| Название | Состав | ТЭДС, мВ (при $t_0 = 0$ и $t_1 = 100\text{ }^\circ\text{C}$) | Максимальный температурный предел, $^\circ\text{C}$ |
|--------------|-----------------|---|---|
| Хромель | 10% Cr + 90% Ni | +2,95 | 1000 |
| Платинородий | 90% Pt + 10% Rh | +0,86 | 1300 |
| Медь | Cu | +0,76 | 350 |
| Платина | Pt | 0 | 1300 |
| Алюмель | 95% Ni + 5% Al | -1,2 | 1000 |
| Копель | 56% Cu + 44% Ni | -4 | 600 |
| Константан | 60% Cu + 40% Ni | -3,4 | 600 |

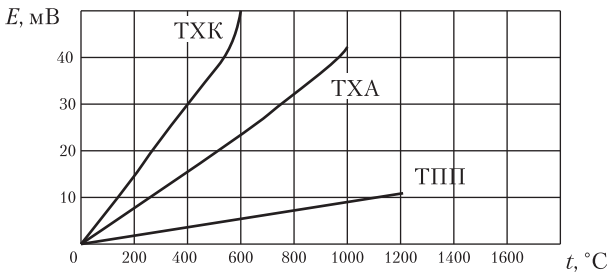


Рис. 3.2. Градуировочные характеристики термопар

Для измерения ТЭДС используются следующие методы и средства:

- метод непосредственной оценки (с помощью милливольтметра);
- компенсационный метод (с помощью потенциометров).

3.5.6. Термометры сопротивления

Измерение температуры термосопротивлениями основано на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Вид функции $R = f(t)$ зависит от природы материала и может быть записан как линейное уравнение

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha t),$$

где α — температурный коэффициент сопротивления; t — температура.

Для изготовления чувствительных элементов серийных термосопротивлений применяются чистые металлы, к которым предъявляются следующие требования:

- металл не должен окисляться или вступать в химические реакции с измеряемой средой;
- температурный коэффициент электрического сопротивления металла α должен быть достаточно большим и неизменным;
- функция $R = f(t)$ должна быть однозначна.

Наиболее полно указанным требованиям отвечают платина, медь, никель, железо и др.

Основной недостаток термосопротивлений: большая инерционность (до 10 мин).

Для измерения температуры наиболее часто применяют термосопротивления типов ТСП (платиновые) и ТСМ (медные).

3.5.7. Пирометры излучения

Пирометры излучения основаны на использовании теплового излучения нагретых тел. Верхний предел измерения температуры пирометра излучения практически не ограничен. Измерение основано на бесконтактном способе, поэтому отсутствует искажение температурного поля, вызываемое введением преобразовательного элемента прибора в измеряемую среду. Возможно измерение температуры пламени и высоких температур газовых потоков при больших скоростях.

Лучистая энергия выделяется нагретым телом в виде волн различной длины. При сравнительно низких температурах (до 500 °С) нагретое тело испускает инфракрасные лучи. По мере повышения температуры цвет тела от темно-красного доходит до белого. Возрастание интенсивности монохроматического излучения с повышением температуры описывается соответствующими уравнениями.

3.5.8. Цветовые пирометры

В цветовых пирометрах определяется отношение интенсивности излучения реального тела E_λ в лучах с двумя заранее выбран-

ными значениями длины волны λ_1 и λ_2 , т.е. показания цветковых пирометров определяются функцией $f(E_{\lambda_1} / E_{\lambda_2})$. Это отношение для каждой температуры различно, но однозначно.

3.6. Вторичные приборы для измерения разности потенциалов

Для измерения ТЭДС в комплектах термоэлектрических термометров применяются пирометрические милливольтметры и потенциометры. В потенциометрах, в отличие от милливольтметров, используется компенсационный метод измерения.

3.6.1. Пирометрические милливольтметры

Пирометрические милливольтметры являются электроизмерительными приборами магнитоэлектрической системы (рис. 3.3).

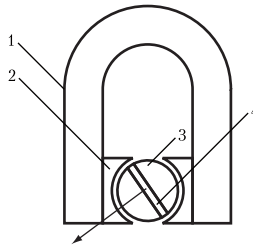


Рис. 3.3. Пирометрический милливольтметр:

1 — подковообразный магнит; 2 — полюсные наконечники; 3 — цилиндрический сердечник; 4 — рамка

В конструкции пирометрических милливольтметров можно выделить магнитную и подвижную системы (см. рис. 3.3). Первая состоит из подковообразного магнита, полюсных наконечников и цилиндрического сердечника. Кольцевой зазор между сердечником и полюсными наконечниками характеризуется наличием практически равномерного электромагнитного поля.

В этом зазоре соосно с сердечником размещается рамка, которая монтируется на кернах, опирающихся на подпятники,

либо на натянутых нитях. Момент сил, противодействующий вращению рамки, создается специальными пружинами.

Взаимодействие тока, протекающего по рамке, с полем постоянного магнита вызывает появление вращающего момента, который, будучи уравновешен противодействующим моментом пружин, поворачивает рамку на определенный угол. Этот угол пропорционален величине протекающего по рамке тока.

3.6.2. Потенциометры

Потенциометры в отличие от милливольтметров работают по компенсационному (нулевому) методу измерения.

Принцип компенсации при измерении ТЭДС заключается в уравновешивании ее известным напряжением ΔU на калибровочном резисторе R_{AB} (рис. 3.4), созданным вспомогательным источником тока. Ток от вспомогательного источника проходит через реохорд R_{AB} . Напряжение U_{AB} пропорционально R_{AB} (в точке D находится движок реохорда).

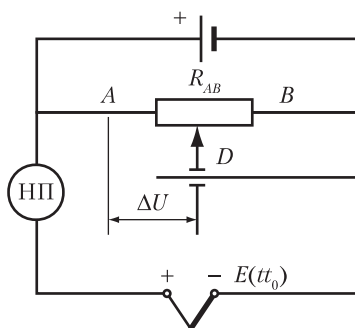


Рис. 3.4. Компенсационный метод измерения

Последовательно с термопарой, генерирующей ТЭДС, включен милливольтметр НП (нуль-прибор) с нулем в середине шкалы. Передвигая движок D , добиваются уравновешивания ΔU и $E(tt_0)$.

3.6.3. Автоматические электрические потенциометры

Схема автоматического потенциометра показана на рис. 3.5.

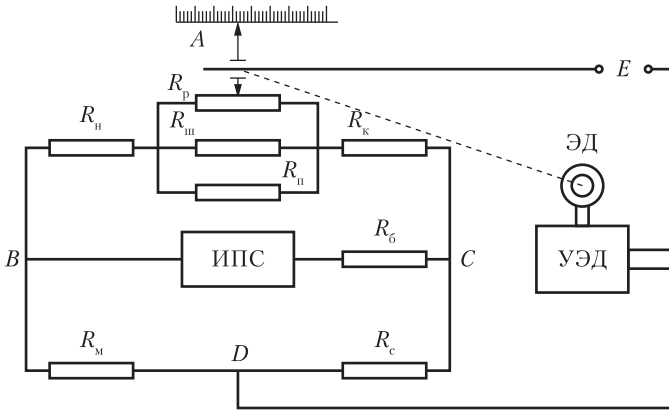


Рис. 3.5. Автоматический электрический потенциометр:

R_p — сопротивление реохорда; $R_{ш}$ — сопротивление шунта; $R_{н}$ — сопротивление для задания пределов измерения; R_n и R_k — сопротивление для задания начала и конца шкалы соответственно; $R_б$ — балластное сопротивление; R_c — сопротивление для проверки рабочего тока; R_m — медное сопротивление для компенсации влияния температуры холодных спаев; ИПС — источник питания стабилизированный; УЭД — усилитель электродвигателя; $ABCD$ — мост сопротивлений

Потенциометр состоит из моста сопротивлений $ABCD$, в одну из диагоналей которого включен источник питания ИПС (диагональ BC), а в другую (измерительную диагональ AD) — термопара с ТЭДС E и электродвигатель (ЭД) с усилителем ЭД (УЭД). В вершине A моста находится реохорд R_p , к движку которого прикреплена стрелка, движущаяся вдоль шкалы. Перемещением движка в свою очередь управляет электродвигатель.

Мост может находиться в двух состояниях: уравновешенном и неуравновешенном.

Когда мост находится в равновесии, то напряжение между его вершинами AD равно по модулю термо-ЭДС ($U_{AD} = E$) и напряжение небаланса ΔU , подаваемое на усилитель УЭД, равно нулю:

$$\Delta U = U_{AD} - E = 0.$$

В данном состоянии ЭД не работает.

Если по каким-либо причинам термо-ЭДС E изменится, то мост выходит из равновесия и на входе усилителя УЭД

появится напряжение небаланса $\Delta U \neq 0$. Усилитель, повысив напряжение, подает его на ЭД, который, вращаясь, перемещает движок реохорда. Перемещение движка продолжается до тех пор, пока мост снова не придет в равновесие и напряжение на ЭД снова не станет равно нулю.

В этих потенциометрах процесс компенсации осуществляется автоматически, непрерывно и с большой скоростью. Эти приборы имеют устройства для автоматического внесения поправки на температуру холодных спаев термопары.

3.7. Методы измерения сопротивления

Для измерения сопротивлений термоэлектрических сопротивлений (ТС) часто используют автоматические электронные мосты, включенные по двухпроводной, трехпроводной или четырехпроводной схемам.

Двухпроводная схема подключения моста к ТС показана на рис. 3.6.

Условием равновесия моста является равенство произведений противолежащих плечей, т.е. в данном случае

$$R_1 \cdot R_3 \approx R_2 \cdot (R_4 + R_T + 2R_{л}).$$

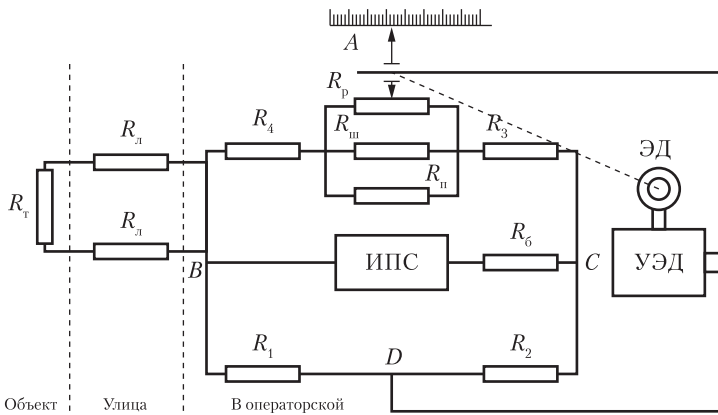


Рис. 3.6. Автоматический электронный мост:

R_1, R_2, R_3, R_4 — сопротивления моста; R_0 — балластное сопротивление для ограничения рабочего тока; R_T — сопротивление ТС; $R_{л}$ — сопротивление линии (соединительных проводов)

Когда мост уравновешен, напряжение на диагонали $U_{AD} = 0$ и, следовательно, ЭД не работает. При изменении температуры объекта изменяется R_T и U_{AD} перестает быть нулевым. Это напряжение усиливается УЭД и подается на ЭД, который, вращаясь, перемещает движок реохорда.

Недостатком такой схемы является то, что сопротивления линии входят в одно плечо с R_T , следовательно, изменение R_L может вызывать изменение показаний моста. Для компенсации R_L применяются трехпроводная или четырехпроводная схемы.

Трехпроводная схема подключения моста показана на рис. 3.7.

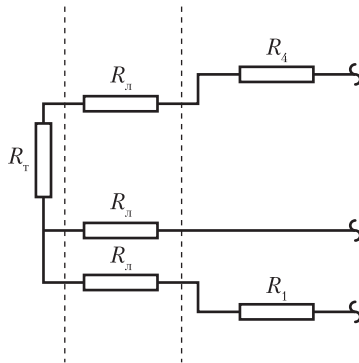


Рис. 3.7. Трехпроводная схема подключения моста

В этом случае уравнение равновесия имеет вид

$$(R_1 + R_L) \cdot R_3 \approx R_2 \cdot (R_4 + R_T + R_L).$$

То есть сопротивление линии R_L входит в обе части уравнения и частично компенсируется.

3.8. Методы и приборы для измерения давления и разряжения

Под давлением в общем случае понимают предел отношения нормальной составляющей усилия к площади, на которую действует усилие.

В зависимости от природы контролируемого процесса нас интересует абсолютное P_a или избыточное давление $P_{и}$. При измерении P_a за начало отсчета принимается нулевое давление, которое можно себе представить как давление внутри сосуда после полной откачки воздуха. Естественно, достигнуть $P_a = 0$ невозможно.

Барометрическое давление $P_{бар}$ — давление, оказываемое атмосферой на все находящиеся в ней предметы.

Избыточное давление $P_{и}$ представляет собой разность между абсолютным и барометрическим давлениями:

$$P_{и} = P_a - P_{бар}.$$

Если $P_a < P_{бар}$, то $P_{и}$ называется давлением разряжения.

Приборы для измерения давления классифицируют следующим образом.

1. По принципу действия:

- жидкостные (основанные на уравнивании давления столбом жидкости);
- поршневые (измеряемое давление уравнивается внешней силой, действующей на поршень);
- пружинные (давление измеряется по величине деформации упругого элемента);
- электрические (основанные на преобразовании давления в какую-либо электрическую величину).

2. По роду измеряемой величины:

- манометры (измерение избыточного давления);
- вакуумметры (измерение давления разряжения);
- мановакуумметры (измерение как избыточного давления, так и давления разряжения);
- напорометры (для измерения малых избыточных давлений);
- тягомеры (для измерения малых давлений разряжения);
- тягонапорометры;
- дифманометры (для измерения разности давлений);
- барометры (для измерения барометрического давления).

3.8.1. Жидкостные манометры

Широко применяются в качестве образцовых приборов для лабораторных и технических измерений. В качестве рабочей жидкости используются спирт, вода, ртуть, масла.

Двухтрубный манометр представляет собой U -образную трубку, заполненную жидкостью (рис. 3.8).

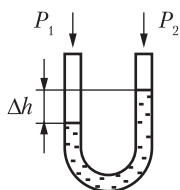


Рис. 3.8. Двухтрубный манометр

Давление в каждой трубке связано с уровнями жидкости как

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h_1 \text{ и } P_2 = \rho \cdot g \cdot h_2,$$

где h_1 и h_2 — уровни жидкости в трубках.

Тогда о разности давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ можно судить по разности уровней жидкости $\Delta h = h_1 - h_2$:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h.$$

3.8.2. Чашечные манометры и дифманометры

Чашечный (однотрубный) манометр является разновидностью U -образного трубного манометра (рис. 3.9), у которого одна из трубок заменена сосудом большого диаметра (чашкой). Измеряется давление P_a , действующее на жидкость в широком сосуде, а открытый конец трубки совмещен с атмосферой.

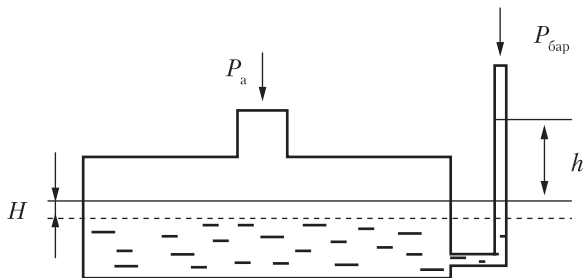


Рис. 3.9. Чашечный манометр

Уравнение равновесия:

$$P = \rho g(h + H).$$

Чашечные и трубные манометры применяются для тарировки и поверки рабочих приборов, реже — в качестве рабочих приборов.

3.8.3. Микроманометры

Применяются для измерения давлений, меньших 100–200 мм водяного столба. Представляют собой жидкостной манометр с наклоненной под углом $20\text{--}50^\circ$ трубкой (рис. 3.10).

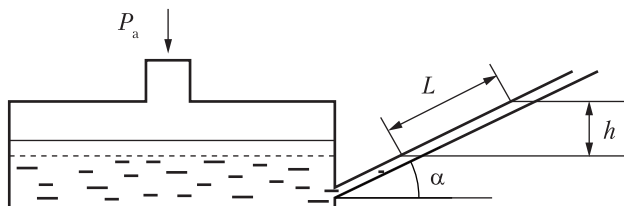


Рис. 3.10. Жидкостной микроманометр:

$h = L \sin(\alpha)$ — высота поднятия уровня жидкости в узкой трубке;
 $P = \rho gh$ — измеренное давление

Погрешность: $\pm 1,5\%$.

3.8.4. Пружинные манометры

Пружинный манометр представлен на рис. 3.11. При увеличении давления трубчатая пружина стремится разогнуться, в результате чего она через поводок начинает воздействовать на зубчатый сектор, отклоняя стрелку.

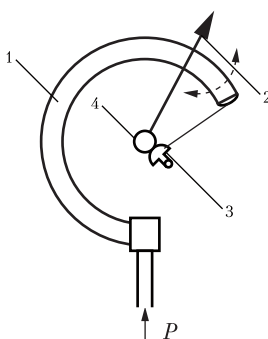


Рис. 3.11. Пружинный манометр:

1 — трубчатая пружина с поводком; 2 — стрелка; 3 — зубчатый сектор; 4 — шестерни

3.9. Методы и приборы для измерения расхода пара, газа и жидкости

Количество вещества выражается в единицах объема (м^3) или массы (кг). Количество жидкости с равной степенью точности может быть измерено и объемным, и массовым методами, количество газа — только объемным. Для твердых и сыпучих материалов используется понятие насыпной или объемной массы, которая зависит от гранулометрического состава сыпучего материала. Для более точных измерений количество сыпучего материала определяется взвешиванием.

Расходом вещества называется количество вещества, проходящее через данное сечение трубопровода в единицу времени. Массовый расход измеряется в кг/с, объемный — в $\text{м}^3/\text{с}$.

Приборы, измеряющие расход, называются расходомерами. Эти приборы могут быть снабжены счетчиками (интеграторами), тогда они называются расходомерами-счетчиками. Такие приборы позволяют измерять расход и количество вещества.

Приборы классифицируют следующим образом.

1. Механические:

а) объемные:

- ковшовые;
- барабанного типа;
- мерники;

б) скоростные:

- по методу переменного перепада давления;
- по методу постоянного перепада давления;
- напорные трубки;
- ротационные.

2. Электрические:

а) электромагнитные;

б) ультразвуковые;

в) радиоактивные.

3.9.1. Метод переменного перепада давления

Является самым распространенным и изученным методом измерения расхода жидкости, пара и газа.

В измерительной технике сужающими устройствами являются диафрагмы, сопла и сопла Вентури.

Наиболее часто из них применяются диафрагмы, которые представляют собой тонкий диск, установленный в трубопроводе так, чтобы его отверстие было концентрично внутреннему контуру сечения трубопровода (рис. 3.12). Сужение потока начинается до диафрагмы. Затем на некотором расстоянии за ней благодаря действию сил инерции поток сужается до минимального значения, а далее постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и за ней образуются зоны с вихревым движением.

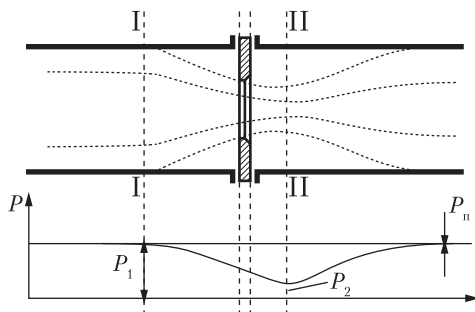


Рис. 3.12. Сужающая диафрагма:

I—I — сечение потока до искажения формы; II—II — сечение в месте максимального сужения; P_n — потери давления на трение и завихрения

Разность давлений $P_1 - P_2$ нелинейно зависит от расхода среды, протекающей через трубопровод:

$$F = K\sqrt{P_1 - P_2},$$

где K — коэффициент, зависящий от сечения трубы, вязкости жидкости, шероховатости стенок.

В случае использования сопла струя, протекающая через него, не отрывается от его профилированной части и поэтому P_n меньше. Еще меньше потери P_n в сопле Вентури.

Перепад давления измеряется дифманометрами (рис. 3.13). Комплект расходомера состоит из следующих элементов:

- сужающее устройство (Д);
- импульсные трубки (Т);
- дифманометр (ДМ).

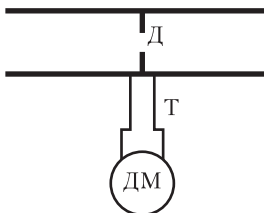


Рис. 3.13. Дифманометр:
 Д — сужающее устройство;
 Т — импульсные трубки;
 ДМ — дифманометр

Поскольку зависимость между расходом и перепадом давления нелинейна, то либо используется нелинейная шкала показывающего прибора, либо специальные устройства извлечения корня из значения поступающего с ДМ сигнала.

3.9.2. Расходомеры постоянного перепада давления

К ним относятся гидродинамические, поршневые, поплавковые, ротаметрические расходомеры.

Наиболее распространенными приборами группы расходомеров постоянного перепада давления являются ротаметры (рис. 3.14), которые имеют ряд преимуществ перед расходомерами переменного перепада давления:

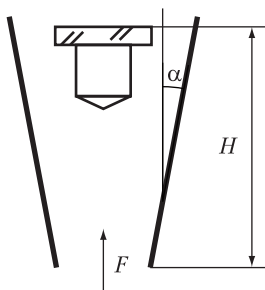


Рис. 3.14. Ротаметр:

F — расход проходящего через трубку газа или жидкости; α — угол наклона стенок трубки; H — положение поплавка

- а) потери P_n незначительны и не зависят от расхода;
- б) имеют большой диапазон измерения и позволяют измерять малые расходы.

Принцип действия основан на измерении положения H поплавка, вращающегося в расширяющейся кверху трубке под влиянием направленной вверх струи.

Зависимость H от F нелинейна, но в начальном и среднем участках равномерность делений шкалы искажается в незначительной степени.

Отсутствие прямой зависимости между F и H требует индивидуальной градуировки каждого прибора.

Ротаметрические трубки обычно изготавливаются из стекла, на которое наносится шкала.

Ротор также может быть изготовлен в виде шарика или диска.

3.9.3. Расходомеры переменного уровня

Используются для измерения расходов смесей продуктов, содержащих твердые частицы, пульсирующих потоков, особо активных сред. Измерения осуществляются при атмосферном давлении. Расходомер состоит из следующих элементов (рис. 3.15).

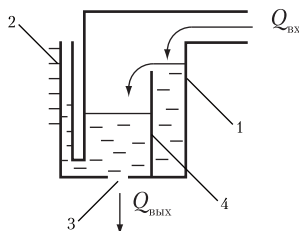


Рис. 3.15. Расходомер переменного уровня:

1 — калиброванный сосуд; 2 — уровеньное стекло; 3 — отверстие в днище; 4 — перегородка для успокоения потока

3.9.4. Расходомеры скоростного напора

Измерение расхода основано на зависимости динамического напора от скорости потока измеряемой среды.

Дифманометр, соединяющий обе трубки, показывает динамическое давление, по которому судят о скорости потока и, следовательно, о расходе (рис. 3.16).

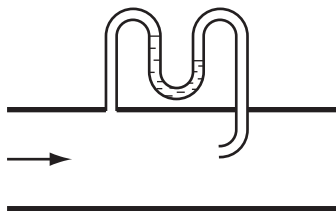


Рис. 3.16. Расходомер скоростного напора

3.10. Методы и приборы для измерения уровня

Под измерением уровня понимается индикация положения раздела двух сред различной плотности относительно какой-либо горизонтальной поверхности, принятой за начало отсчета. Приборы, выполняющие эту задачу, называются уровнемерами.

Методы измерения уровня:

- поплавковый;
- буйковый;
- гидростатический, электрические и др.

3.10.1. Поплавковый метод измерения уровня

Поплавковый уровнемер построен по принципу использования выталкивающей силы жидкости. Чувствительный элемент представляет собой тело произвольной формы (поплавок), плавающее на поверхности жидкости и имеющее постоянную осадку. Поплавок перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости, и текущее значение уровня определяется фиксацией положения поплавка.

3.10.2. Буйковые уровнемеры

Действие буйкового уровнемера (рис. 3.17) основано на законе Архимеда. Чувствительный элемент буйкового уровнемера — буй — массивное тело, подвешенное вертикально внутри сосуда, уровень жидкости в котором контролируется. По мере изменения уровня жидкости изменяется погружение

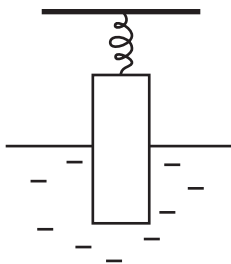


Рис. 3.17. Буйковый уровнемер

буя вследствие компенсации выталкивающей силы жидкости изменением усилия в подвеске. Осадка буя переменная.

Таким образом, по величине погружения буя судят об уровне жидкости в сосуде. Характеристика буйкового уровнямера линейная, а чувствительность тем больше, чем больше площадь поперечного сечения буя.

3.10.3. Гидростатические уровнемеры

В этих приборах измерение уровня жидкости постоянной плотности сводится к измерению давления, созданного столбом жидкости $P = \rho_{\text{ж}} gh$.

Различают пьезометрические уровнемеры и уровнемеры с непосредственным измерением столба жидкости (рис. 3.18).

Пьезометрические уровнемеры применяются для измерения уровня самых разнообразных, в том числе вязких и агрессивных жидкостей.

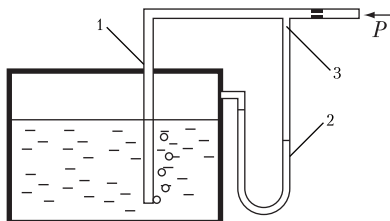


Рис. 3.18. Гидростатический уровнемер:

1 — пьезометрическая трубка; 2 — дифманометр; 3 — дроссель

Воздух из пьезометрической трубки 1 барботирует через слой жидкости. Количество воздуха, подаваемого под давлением, ограничивается дросселем 3 таким образом, чтобы скорость движения его в трубопроводе была минимально возможной. Уровень жидкости определяется по разности давления в дифманометре 2.

3.10.4. Электрические методы измерения уровня

Для измерения уровня жидкости может быть использовано различие электрических свойств жидкости и парогазовой смеси под ней (рис. 3.19). Под электрическими свойствами понимаются диэлектрическая проницаемость и электропроводность веществ.

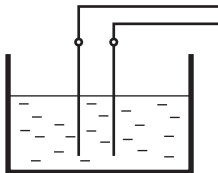


Рис. 3.19. Электрический метод измерения уровня

Кондуктометрический метод измерения уровня основан на измерении электрической проводимости первичного преобразователя, зависящей от значения уровня.

Емкостной метод измерения основан на изменении емкости первичного преобразователя в зависимости от положения уровня измеряемой среды. Обычно первичный преобразователь выполняется в виде коаксиальных цилиндрических обкладок, погруженных в измеряемую жидкость. С изменением уровня жидкость заполняет пространство между обкладками и тем самым изменяет их электрическую емкость. Зависимость между уровнем жидкости и емкостью пропорциональная.

3.10.5. Радиоволновые уровнемеры

Предназначены для бесконтактного измерения и сигнализации уровня жидкости и сыпучих материалов путем облучения контролируемой среды радиоволнами (рис. 3.20).

В результате обработки параметров отраженной радиоволны выделяется сигнал, пропорциональный расстоянию от датчика до поверхности L .

Достоинства уровнемеров: надежность, температурная стабильность, отсутствие контакта с измеряемым продуктом, компактность и т.д.

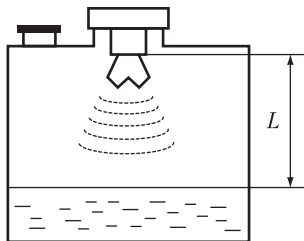


Рис. 3.20. Радиоволновый уровнемер

Глава 4

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ В АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В области автоматизации за последнее десятилетие произошли революционные изменения. Особенно это касается России. Бывшая советская электронная промышленность не выдержала рыночных преобразований и не смогла в начале 1990-х гг. удовлетворить спрос на высококачественные контроллеры нового поколения. К этому времени в мире уже появились и полностью оформились новые направления автоматизации технологических процессов. И базировались они прежде всего на применении микропроцессорной техники, персональных компьютеров, контроллеров, функционирующих под управлением специализированного программного обеспечения. Начался процесс интеграции нашей страны в мировую рыночную экономическую систему.

Фирм-производителей и продуктов, ими производимых, достаточно много: Trace Mode (AdAstrA), FIX (Intellution), InTouch (Wonderware), Genesis (Iconics Co), RealFlex (BJ Software Systems), Sitex (Jade Software), Factory Link (United States Data Co) и т.д. (всего свыше 30 фирм, среди которых есть и российские). И это только производители программных продуктов.

Среди наиболее популярных производителей аппаратных средств автоматизации фирмы ABB, Advantech, Allen—Bradley, Bristol Babcock, Control Microsystems, Fisher — Rosemount,

Foxboro, GE Fanuc, Hewlett Packard, Hitachi, Honeywell, Koyo, Mitsubishi, Motorola, Omron, PEP Modular Computer, Samsung, Schneider Electric, Siemens, Toshiba, Yokogawa и др.

Отечественные производители также подключились к этой «многоголосице». Вот некоторые названия производимых ими контроллеров и программно-технических комплексов: Ремиконт, Техноконт, Сириус, Эмикон-2000, МФК, ТК52, Деконт, КРУИЗ, КРУГ-2000 и т.д.

Отметим, что отечественные программно-технические комплексы и прикладное программное обеспечение сейчас являются вполне конкурентоспособными на российском рынке средств и систем управления. И это не смотря на то что такие известные российские фирмы, как ВИРА Реалтайм, AdAstra, только что отметили свой десятый день рождения, в то время как целый ряд зарубежных фирм-производителей, перечисленных выше, существуют уже не один десяток лет.

Российскому потребителю, а именно специалистам по автоматизации на производстве, сейчас очень трудно. Ведь еще совсем недавно основными средствами автоматизации в нашей стране были пневмоавтоматика и громоздкие телемеханические системы, а централизованные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) строились на базе специализированных управляющих вычислительных комплексов (УВК) типа М-6000, СМ-4.

«Революция» в области автоматизации произошла так быстро (практически за 5—7 лет), что не успело смениться поколение специалистов. Это означает, что многих специалистов надо переучивать, а иначе они будут тормозить процесс дальнейшей автоматизации на производстве. Молодое поколение специалистов, которое общается на «ты» с компьютерами и контроллерами, пока еще не определяет уровень автоматизации на местах.

Не менее трудно и студенту, готовящемуся вступить в мир автоматизации технологических процессов. Трудно потому, что практически нет учебных пособий, учебников, которые помогли бы разобраться во всем этом бесконечном многообразии современных средств и систем управления, программного обеспечения. Сейчас информацию об этом можно получить из документации на оборудование и программное обеспечение фирм-производителей, а она далеко не всем доступна. Другим источником информации традиционно являются статьи в наиболее популярных специализированных журналах, таких, как «Приборы и системы, управление, контроль, диагностика»,

«Промышленные АСУ и контроллеры», «Мир компьютерной автоматизации — МКА», «Современные технологии автоматизации — СТА» и др. Это достаточно доступный источник, но журнальная статья, как правило, посвящена одной узкой проблеме. Конечно, есть Интернет, и тот, кто имеет доступ в эту огромную «библиотеку», может найти там интересующую его информацию.

Современные программно-технические комплексы реализуют следующие две функции.

1. Сначала с помощью программного пакета проектируется система управления, т.е. на экране станции оператора/диспетчера создается мнемосхема технологического процесса, отображаются контуры контроля и регулирования, создается база данных, задаются предельные значения параметров (так называемые «алармы»), конфигурируются тренды и т.д.

2. Затем к спроектированной на компьютере системе подключается технологический объект, оборудованный средствами автоматизации (датчиками, исполнительными устройствами, контроллерами), и система начинает выполнять функции управления технологическим процессом.

Такие системы принято называть интегрированными системами проектирования и управления.

Исторически сложилось так, что изобретение микропроцессоров положило начало эры программируемых логических контроллеров — ПЛК (Programmable Logic Controller — *PLC*). Первые *PLC* пришли на замену дискретным системам управления на базе электромеханических реле.

В соответствии с требованиями задач, для решения которых они предназначались, для *PLC* было характерно преобладание дискретных входных и выходных сигналов (поэтому контроллеры и назвали логическими), высокое быстродействие, слаборазвитое программное обеспечение, не способное выполнять операции с плавающей запятой и функции ПИД-регулирования.

Одна из сфер применения *PLC* — системы телемеханики. *PLC* в этих системах играют роль контролируемых пунктов (КП) и называются *RTU* (Remote Terminal Unit — удаленное терминальное устройство). Для дистанционной передачи данных *PLC* (*RTU*) снабжаются дополнительными коммуникационными модулями и программным обеспечением, реализующим какой-либо протокол передачи данных по проводным или радиоканалам. В нефтегазовой отрасли они

нашли широкое применение при автоматизации процессов добычи и транспортировки нефти и газа.

Несколько позже на замену аналоговым приборам (регуляторам) пришли *DCS*-системы (*Distributed Control System* — распределенные системы управления), адаптированные для управления непрерывными технологическими процессами. Это уже не просто контроллер, а целый комплекс технических и программных средств:

- набор процессоров с четко распределенными функциями (например, управляющий, интерфейсный, прикладной);
- рабочие станции (станции оператора);
- каналы связи;
- ПО для конфигурирования (программирования) контроллеров и для создания человеко-машинного интерфейса.

В 1980-е гг. оба рассмотренных выше класса микропроцессорных систем (на базе *PLC* и *DCS*) имели свои сферы применения и своих производителей.

В силу своей дороговизны *DCS* применялись, как правило, в крупных системах управления. В некоторых случаях в крупных системах *PLC* использовались как подсистема для решения задач противоаварийной защиты и блокировок.

Затем *PLC* стали приобретать некоторые свойства, которые позволили им успешно внедриться в сферу небольших систем управления непрерывными процессами. К этим свойствам можно отнести достаточно развитый ввод/вывод аналоговых сигналов и возможности ПИД-регулирования. Такие контроллеры получили название *SLC* (*Single Loop Controller*), так как они позволяли реализовать один-два контура регулирования. Подобные контроллеры были в номенклатуре многих производителей *DCS* и некоторых фирм — производителей *PLC*.

Большую роль в перераспределении рынка средств и систем управления в пользу *PLC* сыграло появление специализированного программного обеспечения операторских интерфейсов *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition* — супервизорное/диспетчерское управление и сбор данных). Это усилило проникновение *PLC* в те области, где они могли бы успешно конкурировать с *DCS*. *DCL* в свою очередь взяли на вооружение современные средства обработки дискретных сигналов. И, чтобы не быть окончательно вытесненными с рынка, производители *DCS* вынуждены были перейти к созданию «открытых» систем.

В результате борьбы за выживаемость на рынке наборы функций, реализуемых в *PLC* и *DCS*, а следовательно, и обла-

сти их применения, в значительной степени стали перекрываться. Уже к концу XX в. каждый второй *PLC* продавался для использования в управлении непрерывными технологическими процессами.

Характерной особенностью *DCS* 1980-х гг. была замкнутость их архитектуры и несовместимость с программно-аппаратными средствами различных фирм — производителей *PLC*. Это приводило к повышенным эксплуатационным затратам. Дальнейшее совершенствование *DCS*-комплексов могло бы потребовать огромных затрат от производителей. Решение проблемы было найдено в переходе к созданию «открытых» систем. Смысл этого заключался в использовании при создании *DCS* стандартных элементов, узлов, программного обеспечения, протоколов передачи данных и т.п. Стандартизация привела к появлению большого числа фирм, производящих отдельные элементы систем управления, и еще большего количества «системных интеграторов» — компаний и фирм, которые собирали и внедряли под «ключ» законченные системы. Резко возросла конкуренция, что положительно отразилось на цене систем управления и их технических характеристиках.

В результате всех этих причин произошел постепенный переход от традиционной архитектуры *DCS*, в которой *PLC* выполняли роль подсистемы управления дискретными процессами, требующими быстрой реакции, к архитектуре, в которой *PLC* выполняет функции управления любыми непрерывными и дискретными процессами, а персональные или промышленные компьютеры служат в качестве операторского интерфейса и выполняют функции диспетчерского управления.

Нельзя сказать, что с помощью *PLC* можно реализовать любую систему управления непрерывными процессами. Имеется некоторая «область», в которой затраты при использовании *PLC* вместе с затратами на инжиниринг меньше аналогичных затрат при использовании *DCS*. Для большинства компаний границы этой области определяются из практического опыта. Первоначальная стоимость аппаратуры и программного обеспечения для систем управления на базе *PLC* практически всегда ниже, чем у систем на базе *DCS*. Однако в больших системах, требующих специальных работ по интеграции и программированию, стоимость системы на базе *PLC* может существенно возрасти и свести на нет всю первоначальную экономию. Как правило, применение *PLC* оправдано в небольших и средних приложениях до 150 контуров регулирова-

ния. А при дальнейшем увеличении контуров регулирования стоимость инжиниринга и задействованных контроллеров начинают неоправданно возрастать.

Сети *DCS* спроектированы так, чтобы обеспечивать высокую работоспособность и избыточность всех системных компонент, что позволяет исключить сбои. Тесная стыковка операторского интерфейса, контроллеров и системного программного обеспечения гарантирует высокую безопасность системы. Некоторые системы на базе *PLC* не могут дать такой же уровень избыточности.

Производители *DCS* предлагают общесистемную поддержку, осуществляемую обслуживающим персоналом одной фирмы на основе контрактов. Производители ПЛК и *SCADA*-систем обычно не осуществляют общесистемного обслуживания, особенно, если заказчик пользуется оборудованием разных изготовителей.

Разделение программно-аппаратных средств автоматизации на два класса — *PLC* и *DCS* — является историческим. Именно под такими названиями эти средства появились на российском рынке, но тогда реализуемые ими функции в системах управления были существенно разными. Сейчас уже можно констатировать, что функциональные возможности этих двух классов в значительной мере перекрываются.

В России контроллеры и системы ведущих мировых фирм сразу завоевали большую популярность. Износоустойчивая модульная структура, возможность реализации распределенных систем управления, высокая надежность обеспечили успех западным производителям. Но стоимость этих контроллеров и систем была (да и сейчас остается) очень высокой.

С середины 1980-х гг. в системах управления все чаще стали использоваться персональные компьютеры. Сначала они играли роль инженерных станций для конфигурирования *DCS* и технической диагностики. С появлением персональных компьютеров в промышленном исполнении и развитием программного обеспечения их все чаще стали использовать в качестве операторских станций в системах мониторинга и диспетчерского управления.

С середины 1990-х г. в системах управления постепенно стала проявляться тенденция сосредоточения функций управления на так называемых промышленных компьютерах. Это было связано с резким падением цен на компьютеры и комплектующие изделия, платы ввода/вывода и средства коммуникации, а также с появлением универсального при-

кладного программного обеспечения типа *SCADA* и средств программирования контроллеров на базе *IBM PC*.

Использование *IBM PC*-платформы в контроллерах за рубежом называется «softlogic» (софтлоджик), а сами *PC*-совместимые контроллеры — «soft PLC» (софт ПЛК).

Появление в России таких контроллеров и дальнейшее их развитие обусловлено, в частности, тем, что у промышленных контроллеров соотношение производительность/цена оказалось лучше на 30–50% по сравнению с традиционными *PLC*.

Промышленные компьютеры (контроллеры) представляют собой программно совместимые с обычными персональными компьютерами *IBM PC* машины (*PC*-совместимые контроллеры), адаптированные для жестких условий эксплуатации — для установки на производстве, в цехах, газокomppressorных станциях и т.д. Адаптация относится не только к конструктивному исполнению, но и к архитектуре и схемотехнике, так как изменения температуры окружающей среды приводят к дрейфу электрических параметров. В качестве устройств сопряжения с объектом управления эти системы комплектуются дополнительными платами (адаптерами) расширения. В качестве операционной системы в промышленных *PC*, работающих в роли удаленных терминалов, все чаще начинает применяться Windows NT, а также различные расширения реального времени, специально разработанные для этой операционной системы.

Компании — производители *DCS*, *PLC* и *PC*-контроллеров поставляют широкий комплекс программно-технических средств автоматизации.

Кроме микропроцессорных контроллеров нескольких модификаций в состав такого комплекса входят наборы модулей ввода/вывода, различные дисплейные пульты операторов. Для объединения этих компонентов в систему фирмы предлагают различные сетевые решения, снабжая свои комплексы наборами коммуникационных модулей для взаимодействия с сетями различных уровней. Обязательным компонентом является и прикладное программное обеспечение. Эти системы в России получили название программно-технических комплексов (ПТК).

Таким образом, к настоящему времени сложилось два направления на пути создания многоуровневых систем управления технологическими процессами:

- системы, построенные на базе *PLC* со своим пакетом программирования и станций оператора/диспетчера (ПК),

оснащенных *SCADA*-пакетом человеко-машинного интерфейса, получившие название *SCADA*-системы;

- *DCS*-системы — интегрированные системы, включающие контроллеры (процессоры), станции оператора (ПК), коммуникационное оборудование и интегрированное программное обеспечение.

В настоящем пособии рассмотрены контроллеры и программно-технические комплексы, нашедшие применение в системах управления технологическими процессами.

4.1. Комплекс технических средств многоуровневой системы управления

Исходя из особенностей объектов автоматизации техпроцессов микроэлектроники, выдвигаются и соответствующие требования к архитектуре, а также аппаратным и программным средствам АСУТП [1,6].

Для автоматизации непрерывных технологических процессов наиболее адаптированы *DCS*-системы. В таких системах все известные функции автоматизации распределены между различными аппаратными средствами системы управления. Каждый компонент системы узко специализирован и «занимается своим делом». Наиболее характерная черта управляющих процессоров *DCS*-систем — способность поддерживать от нескольких десятков до нескольких сотен контуров ПИД-регулирования.

Для рассредоточенных объектов применяют *SCADA*-системы. Задачей таких систем является обеспечение автоматического дистанционного наблюдения и дискретного управления функциями большого количества распределенных устройств (часто находящихся на большом расстоянии друг от друга и от диспетчерского пункта). Количество возможных устройств, работающих под управлением систем диспетчерского контроля и управления, велико и может достигать нескольких сотен. Для этих систем наиболее характерной задачей является сбор и передача данных, которая реализуется дистанционно расположенными терминальными устройствами (*RTU*).

На рис. 4.1 представлена схема комплекса технических средств многоуровневой системы управления, обобщающая многочисленные применения таких систем для управления технологическими процессами.

Как правило, это двух- или трехуровневые системы, и именно на этих уровнях реализуется непосредственное управление технологическими процессами. Специфика каждой конкретной системы управления определяется используемой на каждом уровне программно-аппаратной платформой.

Нижний уровень — уровень объекта (контроллерный) — включает различные датчики (измерительные преобразователи) для сбора информации о ходе технологического процесса, электроприводы и исполнительные устройства для реализации регулирующих и управляющих воздействий. Датчики поставляют информацию локальным контроллерам (*PLC*), которые могут обеспечить реализацию следующих функций:

- сбор, первичная обработка и хранение информации о состоянии оборудования и параметрах технологического процесса;
- автоматическое логическое управление и регулирование;
- исполнение команд с пункта управления;
- самодиагностика работы программного обеспечения и состояния самого контроллера;
- обмен информацией с пунктами управления.

Так как информация в контроллерах предварительно обрабатывается и частично используется на месте, существенно снижаются требования к пропускной способности каналов связи.

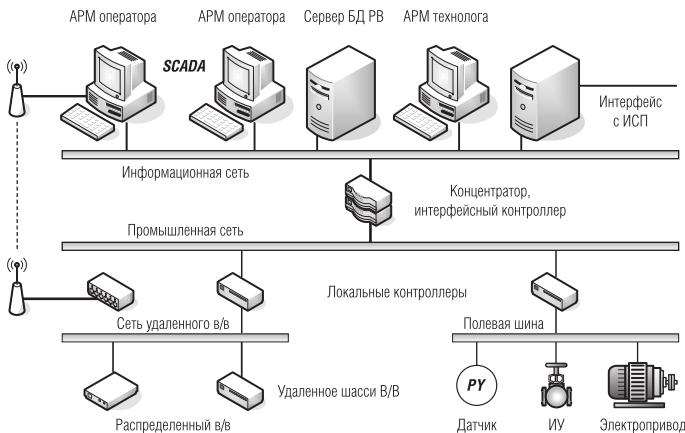


Рис. 4.1. Обобщенная архитектура системы управления

В качестве локальных *PLC* в системах контроля и управления различными технологическими процессами в настоящее время применяются контроллеры как отечественных, так и зарубежных производителей. На рынке представлены многие десятки и даже сотни типов контроллеров, способных обрабатывать от нескольких десятков до нескольких тысяч и даже десятков тысяч переменных.

Разработка, отладка и исполнение программ контроллерами осуществляются с помощью специализированного программного обеспечения, широко представленного на рынке. Это прежде всего многочисленные пакеты программ для программирования контроллеров, предлагаемые производителями аппаратных средств. К этому же классу инструментального ПО относятся и пакеты *ISaGRAF* (CJ International France), *InControl* (Wonderware, USA), *ParadyM 31* (Intellution, USA), имеющие открытую архитектуру.

Информация с локальных контроллеров может направляться в сеть диспетчерского пункта непосредственно, а также через контроллеры верхнего уровня (см. рис. 4.1). В зависимости от поставленной задачи контроллеры верхнего уровня (концентраторы, коммуникационные контроллеры) реализуют различные функции. Некоторые из них перечислены ниже:

- сбор данных с локальных контроллеров;
- обработка данных, включая масштабирование;
- поддержание единого времени в системе;
- синхронизация работы подсистем;
- организация архивов по выбранным параметрам;
- обмен информацией между локальными контроллерами и верхним уровнем;
- работа в автономном режиме при нарушениях связи с верхним уровнем;
- резервирование каналов передачи данных и др.

Верхний уровень — диспетчерский пункт (ДП) — включает одну или несколько станций управления, представляющих собой автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера/оператора. Здесь же может быть установлен сервер базы данных. На верхнем уровне могут быть организованы рабочие места (компьютеры) для специалистов, в том числе и для инженера по автоматизации (инжиниринговые станции). Часто в качестве рабочих станций используются ПЭВМ типа *IBM PC* различных конфигураций.

Станции управления предназначены для отображения хода технологического процесса и оперативного управле-

ния. Эти задачи и призвано решать прикладное программное обеспечение *SCADA*, ориентированное на разработку и поддержание интерфейса между диспетчером/оператором и системой управления, а также на обеспечение взаимодействия с внешним миром.

Все аппаратные средства системы управления объединены между собой каналами связи. На нижнем уровне контроллеры взаимодействуют с датчиками и исполнительными устройствами, а также с блоками удаленного и распределенного ввода/вывода с помощью специализированных сетей удаленного ввода/вывода и полевых шин.

Связующим звеном между локальными контроллерами и контроллерами верхнего уровня, а часто и пультами оператора являются управляющие сети.

Связь различных АРМ оперативного персонала между собой, с контроллерами верхнего уровня, а также с вышестоящим уровнем осуществляется посредством информационных сетей.

4.2. Основные технические характеристики контроллеров и программно-технических комплексов

Современный рынок контроллеров и программно-технических комплексов весьма разнообразен. Выбор наиболее приемлемого варианта автоматизации представляет собой многокритериальную задачу, решением которой является компромисс между стоимостью, техническим уровнем, надежностью, комфортностью, затратами на сервисное обслуживание, полнотой программного обеспечения и многим другим.

Поэтому важно выделить основные характеристики и свойства комплексов контроллеров и ПТК, на основании которых можно сделать выбор при построении систем управления.

В качестве таких характеристик в этом пособии предложены пять обобщенных показателей:

- характеристика процессора;
- характеристика каналов ввода/вывода, поддерживаемых контроллерами;
- коммуникационные возможности;
- условия эксплуатации;
- программное обеспечение.

Рассмотрим эти показатели.

4.2.1. Характеристика процессора

Здесь имеется в виду:

- тип, разрядность основной процессорной платы и рабочая частота;
- поддержка математики с плавающей запятой, позволяющая выполнять эффективную обработку данных;
- наличие функции ПИД-регулирования;
- наличие и объем различных видов памяти: ОЗУ (*RAM*), ПЗУ (*ROM*), СППЗУ (*EPROM*), ЭСППЗУ (*EEPROM*), флэш (*Flash*).

ОЗУ (оперативное запоминающее устройство) или *RAM* (Random Access Memory — память с произвольным доступом) представляет собой тип памяти, которая позволяет чтение и запись в любую ячейку без предварительного поиска. В контроллерах этот тип памяти используется для хранения программ и значений технологических параметров (данных).

ОЗУ теряет информацию при отключении питания, однако существуют «энергонезависимые» модули ОЗУ, содержащие встроенный источник автономного питания.

По принципу действия ОЗУ делятся на статические (на триггерах) и динамические (на емкостных ячейках с регенерацией).

Статическая память (*SRAM*) используется для кэширования данных в процессоре и накопителях, динамическая (*DRAM*) составляет основной массив памяти.

ПЗУ (постоянное запоминающее устройство) или *ROM* (Read Only Memory — память только для чтения) устроена в виде адресуемого массива ячеек (матрицы), каждая ячейка которого может кодировать единицу информации. Данные на *ROM* записывались при ее изготовлении путем нанесения на матрице алюминиевых соединительных дорожек литографическим способом. Наличие или отсутствие в соответствующем месте такой дорожки кодировало «0» или «1».

В контроллерах память типа ПЗУ используется для хранения программ пользователя. Данный тип памяти не получил широкого распространения в связи с тем, что современное программное обеспечение зачастую имеет много недоработок и часто требует обновления, в то время как производственный цикл изготовления памяти достаточно длителен (4–8 недель).

Преимущества:

- низкая стоимость готовой запрограммированной микросхемы (при больших объемах производства);

- высокая скорость доступа к ячейке памяти;
- высокая надежность готовой микросхемы и устойчивость к электромагнитным полям.

Недостатки:

- невозможность записывать и модифицировать данные после изготовления;
- сложный производственный цикл.

EPROM (СППЗУ), *EEPROM* (ЭСППЗУ) и *Flash* (флэш) относятся к классу энергонезависимой перезаписываемой памяти (английский эквивалент — Nonvolatile Read-Write Memory или *NVRWM*).

Различные источники по-разному расшифровывают аббревиатуру *EPROM* — как Erasable Programmable ROM или как Electrically Programmable ROM (стираемые программируемые ПЗУ или электрически программируемые ПЗУ). В *EPROM* перед записью необходимо произвести стирание (для получения возможности перезаписывать содержимое памяти). Стирание ячеек *EPROM* выполняется сразу для всей микросхемы посредством облучения чипа ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами в течение нескольких минут.

В *EPROM* стирание приводит все биты стираемой области в одно состояние (обычно во все единицы, реже — во все нули). Запись на *EPROM* осуществляется на программаторах.

Большим достоинством такой памяти является возможность перезаписывать содержимое микросхемы.

Недостатки:

- небольшое количество циклов перезаписи;
- невозможность модификации части хранимых данных;
- высокая вероятность «недотереть» (что в конечном итоге приведет к сбоям) или передержать микросхему под ультрафиолетовым светом, что может уменьшить срок службы микросхемы и даже привести к ее полной негодности.

EEPROM (*E²EPROM* или Electronically EPROM) — электрически стираемая память (ЭСППЗУ) была разработана в 1979 г. компанией Intel.

Главной отличительной особенностью *EEPROM* (в том числе и *Flash*) от ранее рассмотренных типов энергонезависимой памяти является возможность перепрограммирования при подключении к стандартной системной шине микропроцессорного устройства. В *EEPROM* появилась возможность производить стирание отдельной ячейки при помощи электрического тока. Для *EEPROM* стирание каждой ячейки выполняется автоматически при записи в нее новой информации,

т.е. можно изменить данные в любой ячейке, не затрагивая остальные. Процедура стирания обычно существенно длительнее процедуры записи.

Преимущества *EEPROM* по сравнению с *EPROM*:
увеличенный ресурс работы, проще в обращении.

Недостаток:

высокая стоимость.

В контроллерах этот тип памяти используется как для хранения программ, так и для хранения данных.

Flash (полное название — Flash Erase EEPROM) впервые была разработана компанией Toshiba в 1984 г., и уже на следующий год было начато производство 256 Кбит микросхем *flash*-памяти в промышленных масштабах. В 1988 г. компания Intel разработала собственный вариант флэш-памяти.

Во флэш-памяти используется несколько отличный от *EEPROM* тип ячейки-транзистора. Технологически флэш-память родственна как *EPROM*, так и *EEPROM*. Основное отличие флэш-памяти от *EEPROM* заключается в том, что стирание содержимого ячеек выполняется либо для всей микросхемы, либо для определенного блока (кластера, кадра или страницы). Обычный размер такого блока составляет 256 или 512 байт, однако в некоторых видах флэш-памяти объем блока может достигать 256 Кб. Следует заметить, что существуют микросхемы, позволяющие работать с блоками разных размеров (для оптимизации быстродействия). Стирать можно как блок, так и содержимое всей микросхемы сразу. Таким образом, в общем случае, для того, чтобы изменить один байт, сначала в буфер считывается весь блок, где содержится подлежащий изменению байт, стирается содержимое блока, изменяется значение байта в буфере, после чего производится запись измененного в буфере блока. Такая схема существенно снижает скорость записи небольших объемов данных в произвольные области памяти, однако значительно увеличивает быстродействие при последовательной записи данных большими порциями.

Преимущества флэш-памяти по сравнению с *EEPROM*:

- более высокая скорость записи при последовательном доступе за счет того, что стирание информации во флэш производится блоками;
- себестоимость производства флэш-памяти ниже за счет более простой организации.

Недостаток:

медленная запись в произвольные участки памяти.

Поскольку речь идет о памяти процессора, который является основным компонентом управляющего контроллера, предпочтительными типами памяти являются динамическая ОЗУ (*RAM*), которая обладает наибольшим быстродействием, и прогрессирующая флэш-память, которая обладает достаточно высокой скоростью доступа, энергонезависима и имеет невысокую стоимость.

4.2.2. Характеристика каналов ввода/вывода контроллеров

Параметры контроллера с точки зрения поддерживаемых им каналов ввода/вывода часто могут быть определяющими при выборе. Важно не только количество каналов ввода/вывода, поддерживаемое контроллером, но и разнообразие модулей ввода/вывода по количеству и уровням коммутируемых сигналов (ток/напряжение), способы подключения внешних цепей к модулям ввода/вывода, количество каналов локального, удаленного и распределенного ввода/вывода.

Рассмотрим подробнее эти характеристики.

1. Количество поддерживаемых контроллером (процессором) каналов ввода/вывода (аналоговых, дискретных, скоростных).

Большинство фирм-производителей поставляют на рынок средств и систем автоматизации семейства контроллеров, каждое из которых рассчитано на определенный набор выполняемых функций и объем обрабатываемой информации. Среди них имеются семейства самых малых контроллеров (микро) небольшой вычислительной мощности, способных поддерживать максимум несколько десятков вводов/выводов, в основном дискретных. Область применения таких контроллеров — сбор данных и системы противоаварийной защиты. В качестве примеров таких контроллеров можно привести контроллеры семейства *MicroLogix* (Allen — Bradley), *Direct Logic DL05* (Kooyo), *Nano* (Schneider Electric).

Семейства малых контроллеров способны поддерживать уже сотни вводов/выводов, выполнять более сложные функции. Эти контроллеры имеют достаточно развитый аналоговый ввод/вывод, выполняют операции с плавающей точкой и функции ПИД-регулирования. К этой группе контроллеров можно отнести *SLC 500* (Allen — Bradley), *TeleSAFE Micro16* (Control Microsystems), *Simatic S7-200* (Siemens).

Контроллеры средней мощности, обладая достаточной памятью и быстродействием, могут обрабатывать уже тысячи переменных дискретного, аналогового и скоростного типа. Применяются для автоматизации небольших объектов процессов добычи, подготовки и транспортировки нефти и газа. Это контроллеры *PLC-5* (Allen — Bradley), *Premium* (Schneider Electric), *Direct Logic DL405* (Kooyo) и др.

Наконец, некоторые крупные фирмы производят класс контроллеров очень высокой вычислительной мощности, обладающих памятью, измеряемой мегабайтами и десятками мегабайт. Их способность обрабатывать десятки тысяч переменных и предопределила одну из областей применения — в качестве концентраторов информации, получаемой от локальных контроллеров. Вычислительные возможности этого класса контроллеров позволяют реализовывать сложные алгоритмы (адаптивное, оптимальное управление), применяемые при автоматизации непрерывных технологических процессов (переработка нефти и газа, нефтехимия). Наиболее яркими представителями этой группы контроллеров являются *ControlLogix* (Allen — Bradley), *Simatic S7-400* (Siemens), *Fanuc 90-70* (GE Fanuc), *VME* (PEP Modular Computers).

2. Разнообразие коммутируемых сигналов.

Как зарубежные, так и отечественные производители контроллеров комплектуют свои изделия широкой гаммой модулей дискретного и аналогового ввода/вывода. По количеству подключаемых сигналов различают модули на 4, 8, 16, 32 и 64 канала. Такое разнообразие модулей облегчает подбор требуемой конфигурации контроллера, позволяя минимизировать стоимость технических средств.

Коммутируемые модулями дискретного ввода/вывода сигналы могут иметь различный уровень напряжения переменного и постоянного тока. Это 12, 24, 48 В постоянного тока, 120 и 240 В переменного тока с различными нагрузками по току.

Уровни коммутируемых сигналов модулями аналогового ввода/вывода могут быть самыми разнообразными. Это 0—5 В, 0—10 В, ± 5 В, +10 В по напряжению и 0—20 мА, 4—20 мА по току. Есть и специальные модули для ввода в контроллеры сигналов от термопар и термометров сопротивления различных градуировок. Приведенные здесь данные по уровням сигналов, безусловно, не исчерпывают всего разнообразия, представленного на рынке.

Различаются модули ввода/вывода и по способу подключения внешних цепей. К одним модулям внешние цепи подключаются с помощью клемм с винтовыми зажимами. Возможно также подключение внешних цепей через съемные терминальные блоки или фронтальные соединители, что позволяет производить замену модулей без демонтажа внешних цепей. Некоторые производители ПТК предлагают системы ввода/вывода, в которых внешние низковольтные цепи подключаются посредством пружинных зажимов.

На лицевой панели модулей ввода/вывода могут быть расположены светодиоды индикации состояния внешних цепей.

Одной из важнейших характеристик контроллеров является их способность поддерживать локальный, расширенный, удаленный и распределенный ввод/вывод.

Под локальным следует понимать такой ввод/вывод, когда модули ввода/вывода размещаются непосредственно на том же шасси, на котором размещен и модуль центрального процессора. Так как количество слотов в шасси ограничено (максимум 16–18 для некоторых контроллеров), то и количество локальных вводов/выводов может быть также ограничено. Преимущество локальных вводов/выводов заключается в том, что они имеют высокую скорость обновления данных. При всех прочих равных условиях скорость обработки этих вводов/выводов очень высока. Эта характеристика особенно важна, когда речь идет о регулировании технологических параметров.

Для поддержки большего числа переменных фирмы — производители аппаратных средств снабдили свои системы возможностью расширения локального ввода/вывода. Эти шасси расширения с размещенными в них модулями ввода/вывода соединяются между собой специализированным коротким кабелем и могут быть отнесены максимум на несколько десятков метров от центрального процессора. Некоторые комплексы контроллеров способны поддерживать одно/два шасси расширения, другие — десятки шасси с очень большим количеством модулей ввода/вывода.

Например, контроллеры *PLC-5/40L*, *PLC-5/60L* (Allen — Bradley) допускают расширение локального ввода/вывода для ускоренного обновления данных (рис. 4.2). Это позволяет расширенному процессору сканировать до 16 расширенных шасси ввода/вывода. Расширенные шасси могут быть размещены на расстоянии до 30 м от процессора.

Процессоры PLC-5/40L, 5/60L

Локальные расширенные
в/в с адаптером 1771-ALX

Связь локальных расширенных в/в

Рис. 4.2. Организация расширенного ввода/вывода

Удаленный ввод/вывод применяется для систем, в которых имеется большое количество датчиков и других полевых устройств, находящихся на достаточно большом расстоянии (1000 и более метров) от центрального процессора. Это относится и к объектам нефтегазовой отрасли, часто находящихся на больших расстояниях от пунктов управления. Такой подход позволяет уменьшить стоимость линий связи за счет того, что модули ввода/вывода размещаются вблизи полевых устройств.

Часто каналы удаленного ввода/вывода обновляются асинхронно по отношению к сканированию процессора. Поэтому из числа задач, использующих удаленный ввод/вывод, решены могут быть только те, которые не требуют обновления ввода/вывода на каждом шаге.

Фирмы — производители аппаратных средств автоматизации решают проблему удаленного ввода/вывода по-разному.

Поддержка удаленных вводов/выводов может осуществляться посредством модулей, называемых «удаленный ведущий» и «удаленный ведомый». Ведущий модуль располагается в локальном каркасе контроллера и соединяется кабелем с «удаленным ведомым», который находится в удаленном каркасе (контроллеры *DL205*, *DL405* фирмы *Koyo*, контроллер *Quantum* компании *Schneider Electric*). Один ведущий модуль может поддерживать 32, 64, 125 ведомых. В свою очередь некоторые процессоры могут поддерживать несколько ведущих модулей. Таким образом, системы управления, построенные по технологии удаленного ввода/вывода, способны обрабатывать многие тысячи параметров.

На рис. 4.3 показана реализация удаленного ввода/вывода процессорами *D2-240/250* контроллеров семейства *Direct Logic DL205*. Каждый модуль *D2-RMSM* поддерживает один канал удаленных вводов/выводов (до 31 каркаса). Процессор *D2-250* способен поддерживать семь мастер-модулей *D2-RMSM*.

Другое решение организации удаленного ввода/вывода обеспечивается встроенным в процессор портом, играющим

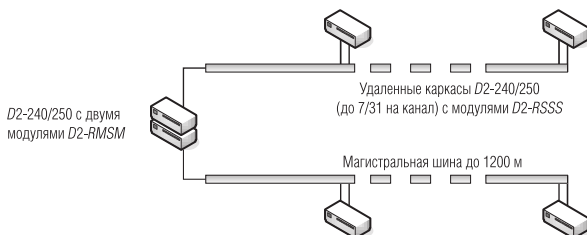


Рис. 4.3. Организация удаленного ввода/вывода

роль «мастера» (контроллеры *PLC-5* фирмы Allen — Bradley, контроллеры *Premium* компании Schneider Electric).

Распределенный ввод/вывод является разновидностью удаленного, с той лишь разницей, что количество параметров, которое требуется «достать», мало (от нескольких параметров до десятков). Поэтому решение с применением каркасов удаленного ввода/вывода, рассчитанных на достаточно большое количество параметров, может оказаться дорогим. В связи с этим некоторые фирмы предлагают специализированные решения (система *Field Control* фирмы GE Fanuc, система ввода/вывода *FLEX I/O* фирмы Allen — Bradley).

Например, для использования модулей ввода/вывода системы *FLEX I/O* необходим монтажный рельс, модуль адаптера, источник питания, модули контактной базы и кабель. Один модуль адаптера может поддерживать до восьми модулей контактной базы. Это позволяет реализовать 128 дискретных вводов/выводов (или 64 аналоговых ввода, или 32 аналоговых вывода). На рис. 4.4 приведен пример организации удаленного и распределенного ввода/вывода на базе контроллеров фирмы Allen — Bradley, системы *FLEX I/O* и сети *Remote I/O*.

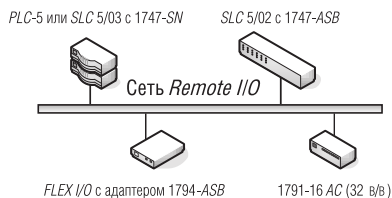


Рис. 4.4. Распределенный ввод/вывод *Flex I/O*

Одно из решений распределенного ввода/вывода — применение интеллектуальных устройств, объединенных полевой шиной.

4.2.3. Коммуникационные возможности контроллеров

К параметрам контроллеров, характеризующим их способность взаимодействовать с другими устройствами системы управления, относятся:

- количество и разнообразие портов в процессорных модулях;
- широта набора интерфейсных модулей и интерфейсных процессоров;
- поддерживаемые протоколы;
- скорость обмена данными и протяженность каналов связи.

На рис. 4.5 представлена сетевая архитектура многоуровневой системы управления.

Устройства верхнего уровня (компьютеры, concentra-

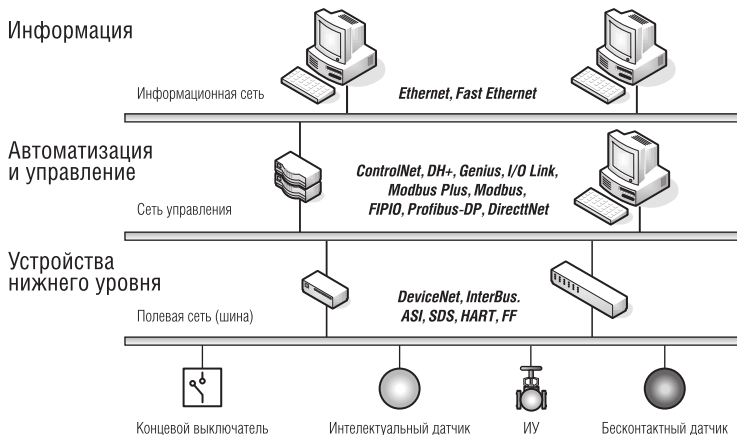


Рис. 4.5. Сетевая архитектура многоуровневой системы управления

торы) на своем уровне обмениваются большими объемами информации. Эта информация защищена механизмами подтверждений и повторов на уровне протоколов взаимодействия. Пересылаемый массив данных может быть доступен не только центральному устройству, но и другим узлам сети

этого уровня. Это означает, что сеть является равноправной (одноранговой), т.е. определяется моделью взаимодействия peer-to-peer (равный с равным). Время доставки информации не является доминирующим требованием к этой сети (речь идет о жестком реальном времени).

Сети, обеспечивающие информационный обмен на этом уровне, называют информационными сетями. Наиболее ярким представителем сетей этого уровня является Ethernet с протоколом *TCP/IP*.

Сети, обеспечивающие информационный обмен между контроллерами, датчиками и исполнительными устройствами, часто объединяются под общим названием — промышленные сети.

Их можно разделить на два уровня:

- управляющие промышленные сети, решающие задачи сбора и обработки данных на уровне промышленных контроллеров, управления технологическим процессом;
- полевые сети или шины, задачи которых сводятся к опросу датчиков и управлению работой разнообразных исполнительных устройств.

Для обеспечения безошибочности и максимального удобства передачи информации сетевые операции регулируются набором правил и соглашений, называемых сетевым протоколом. Сетевой протокол определяет типы разъемов, кабелей, сигналы, форматы данных и способы проверки ошибок, а также алгоритмы для сетевых интерфейсов и узлов, предполагая стандартными в пределах сети принципы подготовки сообщений и их передачи.

На сегодняшний день спектр протоколов для обоих указанных классов промышленных сетей (управляющие и полевые) довольно широк.

CAN, FIP, Profibus, ControlNet, DH+, Modbus, Modbus plus, Genius, DirectNet, DeviceNet, Interbus, SDS, ASI, HART, FF и еще несколько десятков протоколов присутствуют сегодня на рынке промышленных сетей. Каждая из сетей имеет свои особенности и области применения.

Протокол *Modbus* можно назвать наиболее распространенным в мире. Для работы со своими устройствами его используют десятки фирм. Протокол привлекает простотой логики и независимостью от типа интерфейса (*RS-232C, RS-422, RS-485* или же токовая петля 20 мА).

Протокол работает по принципу *Master/Slave* (ведущий-ведомый). Конфигурация на основе этого протокола предпола-

гает наличие одного *Master*-узла и до 247 *Slave*-узлов. Только *Master* инициирует циклы обмена данными. Существует два типа запросов:

- запрос/ответ (адресуется только один из *Slave*-узлов);
- широковещательная передача (*Master* через выставление адреса 0 обращается ко всем остальным узлам сети одновременно).

На рис. 4.6 приведен пример взаимодействия контроллеров *SCADAPack/Slaves* через интерфейс *RS-485*, используя стандартный протокол обмена *Modbus*. Для связи контроллеров *SCADAPack* с рабочей станцией через сеть *Ethernet* использован модуль/шлюз *Ethernet 5905*.

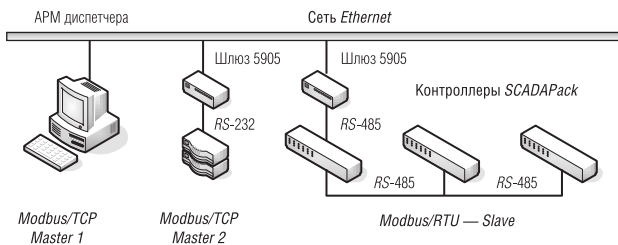


Рис. 4.6. Взаимодействие контроллеров по протоколу *Modbus*

CANbus (Control Area Network) — это последовательная шина с децентрализованным доступом. Возможные коллизии, связанные с одновременным запросом шины, разрешаются на основе приоритетности передаваемых сообщений. В *CANbus* каждый блок данных содержит дополнительный 11-битовый идентификатор, который и является приоритетом данного сообщения. Право на работу с шиной получит тот узел, который передаст сообщение с наивысшим приоритетом.

Протокол *CANbus* закрывает 1-й и 2-й уровни модели *OSI*. По своим характеристикам он удовлетворяет не только требованиям задач реального времени, но и реализует высокую степень обнаружения и исправления ошибок. В каждом сообщении может быть передано до 8 бит данных. Большие блоки можно передавать за счет использования принципа сегментации.

Протокол *Bitbus* разработан фирмой Intel в 1984 г. для построения распределенных систем, в которых требовалось обеспечить высокую скорость передачи, детерминизм и надежность. Физический интерфейс основан на *RS-485*. Интерфор-

мационный обмен организован по принципу «запрос-ответ» (*Master/Slave*).

Протокол *Bitbus* определяет два режима передачи данных по шине:

а) синхронный режим используется при необходимости работы на большой скорости, но на ограниченных расстояниях. В этом режиме к шине можно подключить до 28 узлов, но длина шины ограничивается 30 м. Скорость может быть от 500 кбод до 2,4 Мбод. Синхронный режим передачи предполагает использование двух пар проводов (одной пары — для данных, другой — для синхронизации);

б) использование режима с самосинхронизацией позволяет значительно удлинить шину. Стандартом определены две скорости передачи: 375 кбод (до 300 м) и 62,5 кбод (до 1200 м). Используя повторители, можно объединять последовательно несколько шинных сегментов (до 28 узлов на сегмент). Тогда общее число узлов можно довести до 250, а длину общей шины — до нескольких километров. При этом режиме передачи также используются две пары проводников (одна для данных, другая для управления повторителем).

Протокол *FIP* (Factory Information Protocol) обеспечивает высокие скорости передачи и строго определенные интервалы обновления данных. Протокол имеет гибридный централизованный/децентрализованный контроль за шиной, основанный на принципе широкого вещания. Использование режима широкого вещания избавляет от необходимости присваивания каждому устройству уникального сетевого адреса.

Каждый узел на шине полностью автономен. Все узлы имеют возможность получать предназначенные для них данные. Контроль осуществляется со стороны центрального узла сети, называемого арбитром.

FIP-протокол поддерживает уровни 1, 2 и 7 модели *OSI*. В качестве среды передачи используются витая пара или оптоволокно. Максимальная протяженность сети — 1000 м без повторителей (до 15 км с оптическими повторителями) при скорости обмена 1 Мбит/с. Сеть поддерживает до 128 устройств.

Контроллеры семейства *Premium* (Schneider Electric) используют разновидность сети *FIP (FIPIO)* для организации удаленного ввода/вывода. По этой сети к центральному процессору (через встроенный порт) могут быть подключены (рис. 4.7):

- удаленный ввод/вывод контроллеров *Momentum*;

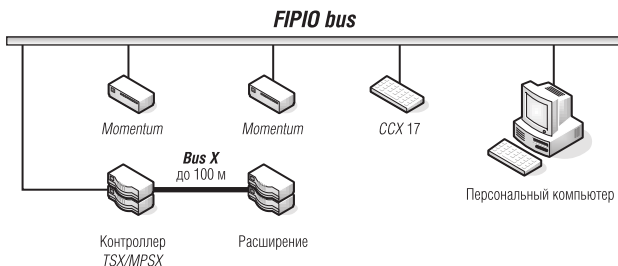


Рис. 4.7. Контроллеры *Momentum* в сети *FIPIO*

- панель управления оператора *CCX 17*;
- персональные компьютеры и другие устройства.

Протокол *Profibus* (PROcess Field BUS) разработан в Германии. Стандарт протокола описывает уровни 1, 2 и 7 *OSI*-модели. В *Profibus* используется гибридный метод доступа *Master/Slave* и децентрализованная процедура передачи маркера. Сеть может состоять из 122 узлов, из которых 32 могут быть *Master*-узлами. Адрес 0 зарезервирован для режима широкого вещания. В среде *Master*-узлов по возрастающим номерам узлов передается маркер, который предоставляет право ведения циклов чтения/записи на шине. Все циклы строго регламентированы по времени, организована продуманная система тайм-аутов. Протокол хорошо разрешает разнообразные коллизии на шине. Настройка всех основных временных параметров идет по сценарию пользователя. Рабочая скорость передачи может быть выбрана в диапазоне 9,6—12 000 кбит/с.

При построении многоуровневых систем автоматизации часто возникают задачи организации информационного обмена между уровнями. В одном случае необходим обмен комплексными сообщениями на средних скоростях. В другом — быстрый обмен короткими сообщениями с использованием упрощенного протокола обмена (уровень датчиков). В третьем требуется работа в опасных участках производства (нефтегазовые технологии, химическое производство). Для всех этих случаев *Profibus* имеет решение. Под общим названием понимается совокупность трех отдельных протоколов: *Profibus-FMS*, *Profibus-DP* и *Profibus-PA*.

Протокол *Profibus-FMS* появился первым и был предназначен для работы на так называемом цеховом уровне.

Здесь требуется высокая степень функциональности, и этот критерий важнее критерия скорости. Основное его назначение — передача больших объемов данных.

В задачах управления, требующих реального времени, на первое место выдвигается такой параметр, как продолжительность цикла шины. Реализация протокола *Profibus-DP* дает увеличение производительности шины (например, для передачи 512 бит данных, распределенных по 32 станциям, требуется всего 6 мс).

Протокол *Profibus-PA* — это расширение *DP*-протокола в части технологии передачи, основанной не на *RS-485*, а на реализации стандарта *IEC1158-2* для организации передачи во взрывоопасных средах. Он может использоваться в качестве замены старой аналоговой технологии 4—20 мА. Для коммутации устройств нужна всего одна витая пара, которая может одновременно использоваться и для информационного обмена, и для подвода питания к устройствам полевого уровня.

Протокол *Profibus-DP* поддерживается устройствами разных производителей. Для контроллеров компании Siemens этот протокол является основным (рис. 4.8). Некоторые контроллеры семейств *S7-300* и *S7-400* имеют встроенный порт *Profibus-DP*, другие взаимодействуют с сетью посредством коммуникационных процессоров.

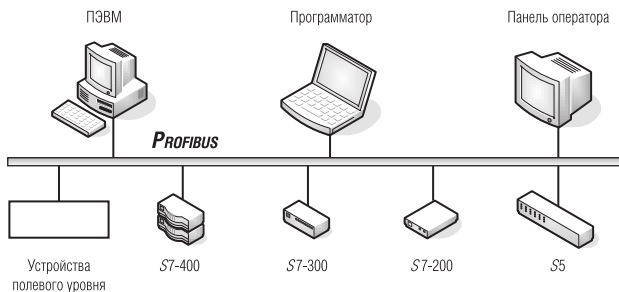


Рис. 4.8. Контроллеры *Simatic S7* в сети *Profibus-DP*

Сеть *DH+* (Allen — Bradley) поддерживает передачу данных и удаленное программирование контроллеров в дополнение к одноранговой связи между другими процессорами и устройствами (рис. 4.9). Магистральная линия сети *DH+* может иметь протяженность до 3048 м, ответвления до 30 м. К одной сети *DH+* можно подключить до 64 устройств. Ско-

рость передачи данных зависит от длины шины и может находиться от 57,6 кбод (3048 м) до 230,4 кбод (750 м).

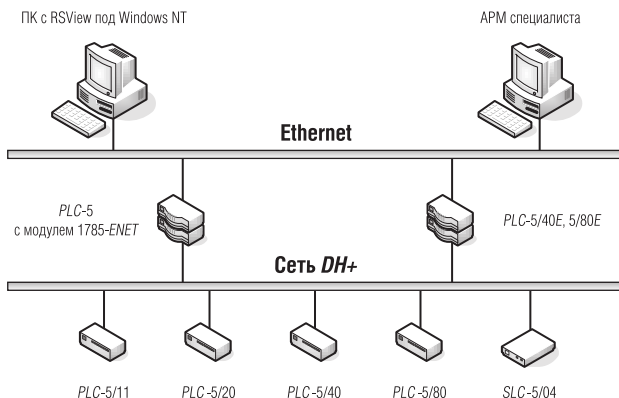


Рис. 4.9. Контроллеры фирмы Allen – Bradley в сети DH+

Характеристика одноранговой связи:

- отсутствие «мастера»;
- минимальный сетевой трафик;
- любой контроллер инициализирует связь с любым сетевым узлом;
- простота наращивания контроллеров в сети.

Сеть *Genius* фирмы GE Fanuc предназначена для объединения в законченную систему контроллеров *GE Fanuc* серий 90–70 и 90–30, удаленной периферии *Genius* и *Field Control* (рис. 4.10). Взаимодействие различных устройств с сетью *Genius* осуществляется посредством контроллеров шины *Genius* (*GBC*), интерфейсных модулей (*GCM*), блоков интерфейса с шиной *Genius* (*BUI*). Физически устройства объединяются в сеть экранированной витой парой. Сеть имеет топологию «шина», к которой может быть подключено до 32 устройств. Максимальная длина шины составляет 2,3 км при скорости обмена 38,4 кбод. Максимальная скорость передачи данных 153,6 кбод достигается при длине линии до 600 м.

Сеть *Genius* поддерживает передачу как глобальных данных (*Global Data*), так и дейтаграмм (при каждом акте сканирования).

Для обмена данными по *Global Data* каждому входящему в состав сети контроллеру выделяется участок адресного пространства. В этот участок он передает данные, указанные при

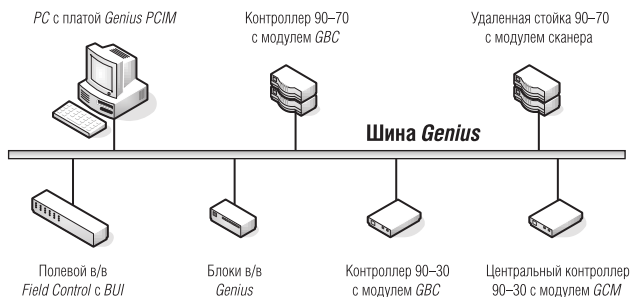


Рис. 4.10. Контроллеры фирмы GE Fanuc в сети *Genius*

конфигурировании его контроллера шины. Передача данных осуществляется без указания контроллера, который должен их получить. Этот участок доступен всем подключенным к шине *PLC* только для чтения. Таким образом, для всей сети создается единый набор данных, используемый для обмена. Один контроллер шины обеспечивает прием/передачу до 128 байт данных от каждого из узлов.

Дейтаграмма (*Datagram*) представляет собой направленную посылку данных от одного контроллера к другому. Прием/передача дейтаграмм происходит под управлением программы пользователя. Момент отправки дейтаграммы может быть задан с требуемой периодичностью или по наступлению какого-либо события.

В последние годы проявилась тенденция применения в системах управления технологий сквозного сетевого доступа: от мощных супервизорных компьютеров и многофункциональных контроллеров до интеллектуальных полевых устройств (датчики, исполнительные устройства и т.п.). При этом такая связь должна удовлетворять всем современным требованиям по функциональности, надежности и открытости. Рассмотренные выше сети и протоколы не предназначены для непосредственного взаимодействия с устройствами полевого уровня.

Полевые шины (шины уровня датчиков и исполнительных устройств) должны удовлетворять двум требованиям. Во-первых, необходимо передавать данные в соответствии с жестким временным регламентом. Во-вторых, объем данных должен быть минимальным, чтобы обеспечить работоспособность сети в критические по нагрузкам моменты. Сеть уровня датчиков обеспечивает непосредственный интерфейс между реальным технологическим процессом и промышленными контроллерами.

Передаваемую в такой сети информацию можно разделить на два основных типа: данные о процессе и параметрические данные. Оба типа данных принципиально различны и предъявляют к коммуникационной системе разные требования.

Данные о процессе (изменение состояния кранов, переключателей, управляющих сигналов и т.п.) не являются сложными и, как правило, определяются несколькими информационными битами. Объем такой информации имеет четкую тенденцию к сокращению. Совсем недавно эти данные для одного простого устройства занимали 8—16 бит. Но уже сейчас развитие технологии привело к тому, что с протейших датчиков (дискретного типа) приходит всего 1—2 бита информации.

Данные о процессе имеют явно выраженный циклический характер. Более того, для реализации задач автоматического управления необходимо, чтобы опрос каналов и выдача команд на управление проводились через регламентируемые интервалы времени. Это так называемое требование детерминированности коммуникационной системы. Благодаря небольшому объему передаваемых данных системы промышленной связи способны действительно удовлетворять временным требованиям со стороны реальных процессов.

Параметрические данные необходимы как для отображения текущего состояния сетевых устройств (интеллектуальных), так и их перепрограммирования. В противоположность данным о процессе параметрическая информация не имеет циклического характера. Доступ к ней реализуется по запросу, в ациклическом режиме. Передача параметрических данных требует и реализует методы специальной защиты, а также механизмов подтверждений. Комплексный параметрический блок для интеллектуальных устройств занимает от нескольких десятков байт до нескольких сотен килобайт. В сравнении с быстро меняющимися данными временные требования для передачи параметров можно считать не критичными. В зависимости от типа устройств и протяженности сети требования по времени простираются от нескольких сотен миллисекунд до нескольких минут.

Рассмотрим несколько промышленных шин уровня датчиков и исполнительных устройств (полевых шин), успешно применяемых при автоматизации технологических процессов.

Первые продукты, работающие по технологии *ASI*, вышли на рынок 1993 г. Сегодня эта технология поддерживается

рядом известных фирм: Allen — Bradley, Siemens, Schneider Electric и др.

Основная задача этой сети — связать в единую информационную структуру устройства нижнего уровня автоматизируемого процесса (фотоэлектрические датчики, исполнительные устройства, реле, контакторы, емкостные переключатели, приводы и т.п.) с системой контроллеров. Это подтверждается и названием сети — *ASI* (Actuator Sensor Interface).

ASI-интерфейс позволяет через свои коммуникационные линии не только передавать данные, но и подводить питание (24 VDC) к датчикам и исполнительным устройствам. Здесь используется принцип последовательной передачи на базовой частоте. Информационный сигнал модулируется на питающую частоту.

Топологией *ASI*-сети может быть шина, звезда, кольцо или дерево. К одному контроллеру можно подключить до 31 устройства. Протяженность сегмента *ASI*-шины может достигать 100 м. За счет повторителей длину сети и число узлов можно увеличивать. Цикл опроса 31 узла укладывается в 5 мс. Максимальный объем данных с одного *ASI*-узла — 4 бита.

На рис. 4.11 контроллеры *Micro* (Schneider Electric) взаимодействуют с полевыми устройствами по шине *ASI*. Функции ведущего обеспечиваются интерфейсным модулем *SAZ 10*.

SDS (Smart Distributed System) — протокол систем ввода/вывода, предложенный компанией Honeywell для построения сетей, объединяющих периферийные устройства различных производителей.

Эта сеть (табл. 4.1) позволяет работать с такими устройствами ввода/вывода, как концевые выключатели, фотоэлектрические и бесконтактные датчики, позиционеры, и осуществлять обмен информацией на высоких скоростях.

Преимущества сети:

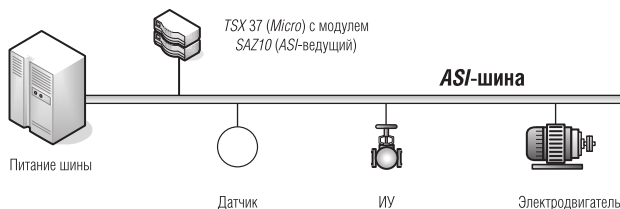


Рис. 4.11. Полевые устройства на шине *ASI*

- одна и та же сеть для контроллеров и источников информации;
- питание осуществляется по проводам сетевого кабеля;
- диагностика на уровне физических устройств;
- время прохождения данных по сети может достигать 0,1 мс.

Таблица 4.1

Характеристика сети

| Длина шины, м | Скорость | Длина ответвления, м | Число устройств |
|---------------|------------|----------------------|-----------------|
| 30,5 | 1 Мбит/с | 0,9 | 32 |
| 121,9 | 500 кбит/с | 1,8 | 64 |
| 243,8 | 250 кбит/с | 3,7 | 64 |
| 487,7 | 125 кбит/с | 7,3 | 64 |

Периферийные устройства подключаются к мастер-модулю *SDS* обычным четырехпроводным кабелем. Таким образом, модуль *SDS* заменяет стандартные модули ввода/вывода, обеспечивая подключение 64 дискретных входов/выходов (распределенный ввод/вывод).

DeviceNet — открытая коммуникационная сеть нижнего уровня, которая обеспечивает подключение полевых устройств (датчиков, исполнительных устройств, приводов и т.д.) к устройствам более высокого уровня — контроллерам.

DeviceNet — это:

- доступ к интеллектуальным датчикам различных производителей;
- связь «мастер/подчиненный» и равноправная;
- конфигурирование датчиков, управление и сбор данных.

DeviceNet — сеть, поддерживаемая рядом ведущих производителей датчиков, приводов и систем управления, в частности фирмой Allen — Bradley.

Эта сеть соединяет устройства нижнего уровня непосредственно с системой управления, уменьшая количество связей ввода/вывода и проводки по отношению к типичным аппаратным решениям (рис. 4.12).

Длина сети *DeviceNet* определяется скоростью передачи данных: 100 м при скорости 500 кбод, 200 м — 250 кбод, 500 м — 125 кбод.

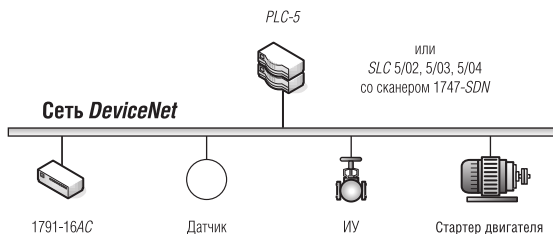


Рис. 4.12. Полевые устройства и модули ввода/вывода серии 1791 в сети *DeviceNet*

Основное назначение протокола *Interbus* — организация коммуникаций на уровне датчиков и исполнительных механизмов. *Interbus* использует процедуру доступа к шине по схеме ведущий/ведомый (*Master/Slave*). Топология *Interbus* — это физическое и логическое кольцо, у которого физический уровень построен на основе стандарта *RS-485*, использующего витую пару для информационных передач. Для реализации кольца используются две витые пары (дуплексный режим). Такая физическая структура позволяет организовать сеть, работающую на скорости 500 кбит/с на расстоянии 400 м между двумя соседними узлами. Включенная в каждое сетевое устройство функция повторителя сигнала позволяет расширить систему до 13 км. Общее число устройств сети ограничено и составляет максимум 256 узлов (рис. 4.13).

На базе основного кольца с использованием так называемых терминальных модулей возможна организация дополнительных кольцевых сегментов (*Interbus Loop*).

С точки зрения семиуровневой *OSI*-модели для стандартных сетей протокол *Interbus* определен на трех уровнях (1, 2 и 7). Важное свойство уровня 2 — возможность реализации

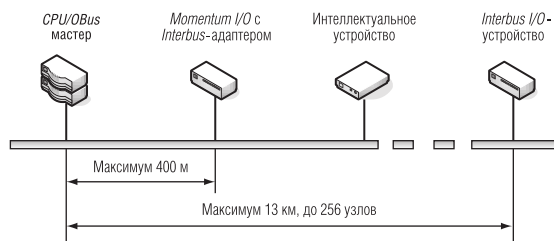


Рис. 4.13. Контроллеры фирмы **Schneider Electric** на шине *Interbus*

в протоколе *Interbus* характеристики детерминированности, т.е. временной определенности циклической транспортировки данных.

Протокол *HART* (Highway Addressable Remote Transducer), разработанный фирмой Rosemount Inc. в середине 1980-х гг., реализует известный стандарт *BELL 202 FSK*, основанный на технологии 4–20 мА.

Стандарт *BELL 202 FSK* — это кодировка сигнала методом частотного сдвига для обмена данными на скорости 1200 бод. Сигнал накладывается на аналоговый измерительный сигнал 4–20 мА. Поскольку среднее значение *FSK* сигнала равно 0, то он не влияет на аналоговый сигнал 4–20 мА.

Схема взаимоотношений между узлами сети основана на принципе *Master/Slave*. В *HART*-сети может присутствовать до двух *Master*-узлов (обычно один). Второй *Master*, как правило, освобожден от поддержания циклов передачи и используется для организации связи с какой-либо системой контроля/отображения данных. Стандартная топология — «звезда», но возможна и шинная организация. Для передачи данных по сети используются два режима:

- асинхронный: по схеме «*Master*-запрос/*Slave*-ответ» (один цикл укладывается в 500 мс);
- синхронный: пассивные узлы непрерывно передают свои данные мастер-узлу (время обновления данных в мастер-узле — 250–300 мс).

Основные параметры *HART*-протокола:

- длина полевой шины — 1,5 км;
- скорость передачи данных — 1,2 кб/с;
- число приборов на одной шине — до 16.

HART-протокол позволяет:

- проводить удаленную настройку датчиков на требуемый диапазон измерения через полевую шину;
- не подводить к датчикам отдельные линии электропитания и не иметь в них блоков питания (электропитание реализуется от блоков питания контроллеров через полевую шину);
- увеличить информационный поток между контроллером и приборами, при наличии самодиагностики в приборах передавать сообщения о неисправностях по полевой шине, а далее — оператору.

Fieldbus Foundation (создана в 1994 г.) — некоммерческая организация, которая объединяет большое количество ведущих мировых поставщиков и конечных пользователей систем

управления технологическими процессами и автоматизации производства.

В 1996 г. была разработана полевая шина, которая использует модификацию стандарта *IEC1158-2* для физического уровня и концепцию *Profibus* для прикладного уровня. Протокол *Foundation Fieldbus (FF)* представляет собой открытую, внедренную в промышленности технологию, которая дает пользователям возможность применять лучшие в настоящий момент полевые устройства различных поставщиков и не призывает их к какому-то определенному производителю.

FF — цифровая, последовательная, дуплексная система передачи данных, соединяющая и поддерживающая взаимодействие полевого оборудования — датчиков, пускателей и контроллеров. *Fieldbus* представляет собой локальную сеть (ЛВС), обладающую возможностью распределять управление по всей сети. Управление процессом включает в себя различные функции: конфигурирование, калибровку, мониторинг, диагностику, а также регистрацию событий, происходящих в различных узлах производственной системы.

В соответствии с многоуровневой моделью открытых систем (*OSI*) протокол полевой шины использует уровни 1, 2 и 7.

Foundation Fieldbus имеет два физических уровня:

- физический уровень *H1 FF* (медленный), обеспечивающий рабочую скорость 31,25 кбит/с. Эта реализация физического уровня основана на модифицированной версии стандарта *IEC 1158-2* и предназначена для объединения устройств, функционирующих во взрывоопасных газовых средах;
- физический уровень *H2 FF* (быстрый), обеспечивающий рабочую скорость до 1Мбит/с и также основанный на стандарте *IEC 1158-2*.

Канальный уровень использует элементы проекта *IEC/ISA SP50* универсальной промышленной сети.

Прикладной уровень включает элементы из проекта *ISP/Profibus*.

Наиболее распространенная топология полевой шины *FF* — шинная (рис. 4.14) и древовидная. Сравнительная характеристика сетей и шин приведена в табл. 4.2.

Практическая реализация сетевого обмена достаточно стандартна. Выход любого устройства в сеть обеспечивается сетевыми платами с встроенными разъемами (портами). Количество портов и разнообразие поддерживаемых ими протоколов и определяет коммуникационные возможности

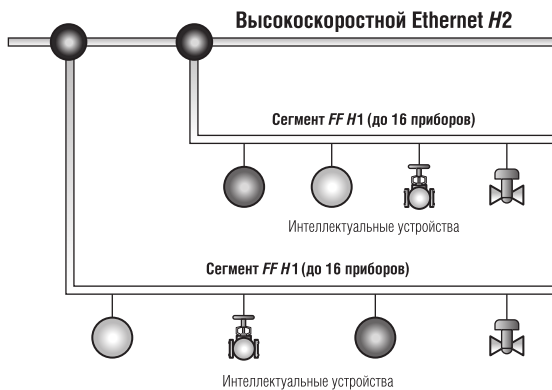


Рис. 4.14. Интеллектуальные устройства на шине FF

контроллера. Производители снабжают свои контроллеры встроенными портами, такими, как RS-232 или универсальным RS-485, допускающим обмен по различным протоколам. Расширение возможностей сетевого обмена, обмен информацией с устройствами различных производителей обеспечивается набором интерфейсных модулей, интерфейсных процессоров, сетевых карт, которые предоставляют дополнительные порты связи.

Таблица 4.2

Сравнительная характеристика сетей и шин

| Сеть | Топология. Метод доступа | Физическая среда | Длина, м | Скорость | Узлы |
|-----------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------|-----------------------|------|
| <i>Ethernet</i> | Шина, звезда | Коак. кабель, витая пара, оптоволокно | 100 2800 | 10 Мбод 100 Мбод | |
| <i>FIP</i> | Кольцо | Витая пара, оптоволокно | 15 000 | 1 Мбод | 128 |
| <i>Profibus</i> | Шина M/S, маркер | Витая пара, оптоволокно | 9600 90 000 | 12 Мбод | 125 |
| <i>Bitbus</i> | Шина M/S | 2 пары проводников | 300 1200 | 375 кбод 62,5 кбод | 28 |
| <i>Modbus</i> | Шина M/S | Витая пара | 1200 | 115,2 кбод | 254 |

Окончание табл. 4.2

| Сеть | Топология. Метод до- ступа | Физическая среда | Длина, м | Скорость | Узлы |
|------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|-------------------------|------|
| <i>DH+</i> | Шина | Витая пара | 3048 750 | 57,6 кбод 230,8 кбод | 64 |
| <i>Genius</i> | Шина | Витая пара, оптоволокно | 600 2300 | 153,6 кбод 38,4 кбод | 32 |
| <i>DeviceNet</i> | Шина | Витая пара | 100 500 | 500 кбод 125 кбод | 64 |
| <i>Interbus</i> | Кольцо <i>M/S</i> | Витая пара, оптоволокно | 12 800 | 500 кбод | 256 |
| <i>ASI</i> | Шина, звезда, кольцо, <i>M/S</i> | Витая пара | 100 — сегмент | — | 31 |
| <i>SDS</i> | Шина <i>M/S</i> | Витая пара | 450 30 | 125 кбод 1 Мбод | 64 |
| <i>HART</i> | Шина, <i>M/S</i> | | 1500 | 1,2 кбод | 16 |
| <i>FF</i> | Шина, звезда | | | До 1 Мбод | 16 |

M/S — *Master/Slave*.

4.2.4. Эксплуатационные характеристики

К группе эксплуатационных характеристик относятся следующие:

1. Возможности резервирования сетей, контроллеров, модулей ввода/вывода и т.д.

К наиболее распространенным способам резервирования относятся:

- горячий резерв отдельных компонентов и/или контроллера в целом (при не прохождении теста в рабочем контроллере управление переходит ко второму контроллеру);

- троирование основных компонентов и/или контроллера в целом с голосованием по результатам обработки сигналов всеми контроллерами, составляющими группу (за выходной сигнал принимается тот, который выдали большинство контроллеров группы, а контроллер, рассчитавший иной результат, объявляется неисправным);

- работа по принципу «пара и резерв». Параллельно работает пара контроллеров с голосованием результатов, а аналогичная пара находится в горячем резерве. При выявлении разности результатов работы первой пары управление переходит ко второй паре. Первая пара тестируется и, либо

определяется наличие случайного сбоя и управление возвращается к первой паре, либо диагностируется неисправность и управление остается у второй пары.

2. Наличие встроенных аккумуляторов и батарей, обеспечивающих работу системы управления при прекращении питания от сети.

3. Условия эксплуатации:

- диапазоны температур и влажности окружающей среды;
- наибольшие вибрации и ударные нагрузки;
- допускаемые электрические и магнитные помехи и т.п.

4. Способы монтажа.

Способы монтажа контроллеров и модулей ввода/вывода достаточно типизированы. Это и корзины с гнездами для различных модулей, и базовые платы с разъемами под модули. Количество модулей, размещаемых в каркасе (корзине) или на базовой плате, может быть различным (от 3 до 18). Сконфигурированные в корзинах и на базовых платах контроллеры могут монтироваться на щитах, в шкафах, профильных рейках. Имеются ПТК, построенные по модульному принципу, в которых монтаж любых модулей (процессорных, ввода/вывода, коммуникационных и т.п.) производится непосредственно на профильной рейке.

5. Габаритные размеры.

Габаритные размеры контроллеров и компонентов систем управления достаточно редко могут быть определяющими при выборе. Тем не менее при рассмотрении конкретных ПТК в последующих разделах пособия эта конструктивная характеристика будет находить свое отражение.

4.2.5. Программное обеспечение

Удобство программирования контроллеров (в более широком смысле — конфигурирования), является очень важной характеристикой. С появлением контроллеров каждый производитель начал предлагать свои решения по их программированию. В результате к началу 1990-х гг. сложилась ситуация, когда на рынке программного обеспечения для программирования контроллеров существовало большое количество языков программирования, а стандарты, их объединяющие и регламентирующие, отсутствовали. Все это негативным образом отражалось на стоимостных характеристиках разрабатываемых систем управления (повышенные затраты на подготовку программистов, на создание программ и т.п.).

В 1992 г. Международная электротехническая комиссия (МЭК, *IEC* – International Electrotechnical Commission) взяла под контроль процессы, связанные с развитием этого типа прикладного ПО.

Стандартом МЭК 1131-3 определяется пять языков программирования контроллеров: три графических (*LD*, *FBD*, *SFC*) и два текстовых (*ST*, *IL*).

LD (Ladder Diagram) – графический язык диаграмм релейной логики. Язык *LD* применяется для описания логических выражений различного уровня сложности.

FBD (Function Block Diagram) – графический язык функциональных блоковых диаграмм. Язык *FBD* применяется для построения комплексных процедур, состоящих из различных функциональных библиотечных блоков – арифметических, тригонометрических, регуляторов, мультиплексоров и т.д.

SFC (Sequential Function Chart) – графический язык последовательных функциональных схем. Язык *SFC* предназначен для использования на этапе проектирования ПО и позволяет описать «скелет» программы – логику ее работы на уровне последовательных шагов и условных переходов.

ST (Structured Text) – язык структурированного текста. Это язык высокого уровня, по мнемонике похож на *Pascal* и применяется для разработки процедур обработки данных.

IL (Instruction List) – язык инструкций. Это язык низкого уровня класса ассемблера и применяется для программирования эффективных, оптимизированных процедур.

Сейчас уже можно сказать, что подавляющее большинство контроллеров и систем управления обслуживается программными продуктами, реализующими стандарт МЭК 1131-3.

Широкое применение в России нашел пакет *ISaGRAF* французской компании CJ International.

Основные возможности пакета:

- поддержка всех пяти языков стандарта МЭК 1131-3 плюс реализация языка Flow Chart как средства описания диаграмм состояний. При этом *ISaGRAF* позволяет смешивать программы и процедуры, написанные на разных языках, а также вставлять кодовые последовательности из одного языка в коды, написанные на другом языке;

- наличие многофункционального отладчика, позволяющего во время работы прикладной задачи просматривать состояние программного кода, переменных, программ и многое другое;

- поддержка различных протоколов промышленных сетей;

- реализация опций, обеспечивающих открытость системы для доступа к внутренним структурам данных прикладной *ISaGRAF*-задачи, а также возможность разработки драйверов для модулей ввода/вывода, разработанных самим пользователем, и возможность переноса *ISaGRAF*-ядра на любую аппаратно-программную платформу;
- набор драйверов для работы с контроллерами различных фирм — производителей: PEP Modular Computers, Motorola Computer Group и др;
- наличие дополнительных интерактивных редакторов для описания переменных, констант и конфигураций ввода/вывода;
- встроенные средства контроля за внесением изменений в программный код *ISaGRAF*-приложения и печати отчетов по разработанному проекту с большой степенью детализации, включая печать таблиц перекрестных ссылок для программ и отдельных переменных;
- полное документирование этапов разработки.

Вместе с тем ведущие фирмы — производители контроллеров и систем управления предлагают свои специализированные пакеты программирования контроллеров.

Рассмотрим программное обеспечение станций операторов/диспетчеров.

SCADA-пакеты позволяют без применения высокоуровневых языков программирования (или с минимальным их применением) создавать программное обеспечение персональных компьютеров (рабочих станций, пультов операторов/диспетчеров), предоставляющее оператору широкий набор функций для мониторинга и управления процессом.

На первом этапе (1980-е гг.) каждый производитель микропроцессорных систем управления разрабатывал собственную *SCADA*-программу. Такие программы могли взаимодействовать только с узким кругом контроллеров и по всем параметрам были закрытыми (отсутствие набора драйверов для работы с устройствами различных производителей и средств их создания, отсутствие стандартных механизмов взаимодействия с другими программными продуктами и т.д.).

В 1990-е гг. сначала зарубежные, а затем и отечественные фирмы начали разрабатывать открытые *SCADA*-программы, которые уже можно было использовать для широкого класса микропроцессорных контроллеров.

Универсальные *SCADA*-программы ведущих фирм, разрабатывающих исключительно программный продукт для систем автоматизации, стали настолько высокоуровневыми, что выдерживать конкуренцию с ними производителям всего комплекса программно-аппаратных средств было уже не под силу. Это привело к тому, что число фирм, разрабатывающих для своих контроллеров оригинальные *SCADA*-программы, стало уменьшаться. Но количество фирм, специализирующихся на выпуске открытых *SCADA*-программ, продолжает расти.

Спектр функциональных возможностей определен самой ролью *SCADA* в системах управления (*HMI* — Human Machine Interface/человеко-машинный интерфейс — ЧМИ) и реализован практически во всех пакетах. Это:

- автоматизированное проектирование системы, дающее возможность создания ПО системы автоматизации без реального программирования (Development);
- исполнение прикладных программ (Run Time);
- сбор первичной информации от устройств нижнего уровня;
- обработка первичной информации;
- регистрация алармов и исторических данных;
- представление текущих и накопленных (архивных) данных в виде графиков (тренды);
- отображение параметров технологического процесса и состояния оборудования с помощью мнемосхем, таблиц, графиков и т.п.;
- поддержка стандартных технологий и протоколов обмена данными;
- дистанционное управление объектами;
- формирование отчетов по созданным на этапе проектирования шаблонам.

Базовый функциональный профиль систем *SCADA/HMI* сформировался еще во времена первых управляющих вычислительных машин. Со временем функциональные возможности *SCADA/HMI* расширялись (появление цветных дисплеев, средств анимации, голосовой сигнализации и т.п.).

С появлением концепции открытых систем программное обеспечение *SCADA/HMI* для операторских станций становится самостоятельным продуктом, свободно взаимодействующим с программно-аппаратными средствами разных производителей.

4.3. Новые технологии в производстве контроллеров

В последние годы при производстве компьютеров/контроллеров широко развиваются стандарты магистрально-модульной архитектуры (*PCI, CompactPCI, VME*). По самому распространенному в Европе стандарту *VME* уже сотни фирм выпускают различные типы плат. Среди них — центральные процессоры, сетевые контроллеры, блоки памяти, модули ввода/вывода и т.д.

VME — это 32/64 разрядная шина с максимальной пропускной способностью 40 Мбит/с. Контроллеры на базе шины *VME* изготавливаются в конструктивах «евромеханика 19» форматов *3U* и *6U*.

Эти стандарты позволяют собирать контроллеры из готовых плат разных фирм, выпускающих продукцию по этим стандартам.

Сборка контроллеров при таком подходе сводится к размещению стандартных плат формата *Evrocard* в конструктивы (стойки, шкафы) такого же стандарта. И конструктивы, и платы имеют широкий диапазон исполнения на разные условия эксплуатации (температуру, влажность, вибрацию, пыль, электромагнитные помехи и т.д.).

Перспективность такого подхода несомненна. Однако высокая стоимость *VME*-контроллеров (на 20—40% дороже по сравнению с обычными контроллерами, имеющими аналогичные характеристики) в настоящее время сдерживает процесс их распространения.

Среди фирм, использующих магистрально-модульную архитектуру *VME* при производстве контроллеров, находятся такие известные производители, как PEP Modular Computers, GE Fanuc (семейство контроллеров 90—70) и др.

Каждый пользователь предъявляет к контроллеру свои требования. Производитель для удовлетворения всех пользователей выпускает множество модификаций стандартной модели. Но такой подход не позволял производителю существенно снизить стоимость своих изделий. А рынок требует функционально гибких контроллеров, которые обеспечивали бы возможность недорогого расширения или изменения их конфигурации и функций. В конце 1990-х гг. производители предложили, наконец, модели контроллеров с изменяющимся уровнем функциональности и интеграции. Достигается это применением наплатных мезонин-модулей в контроллерах с магистрально-модульной архитектурой.

Эти мезонины могут играть роль модулей ввода/вывода, интерфейсов, памяти и т.д. Благодаря этим возможностям можно собирать из готовых модулей контроллеры, структура и характеристики которых будут соответствовать всем требованиям автоматизации конкретного объекта. И, учитывая простую замену отдельных плат в ходе эксплуатации, всегда остается возможность переконфигурировать контроллер в соответствии с расширяющимся кругом задач автоматизации и изменяющимися свойствами объекта. Такой подход позволяет достичь максимально высокого уровня интеграции контроллера при относительно малых затратах.

Системы, построенные на базе *VME*-шины, получили широкое распространение вследствие хорошей производительности и приспособляемости к изменяющимся условиям эксплуатации. В настоящее время рынок промышленных систем развивается в направлении использования *VME*-плат/носителей с установленными на них мезонинами.

Глава 5

АСУТП И ДИСПЕТЧЕРСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

5.1. Общие понятия

В настоящее время *SCADA* (Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных) является наиболее перспективной технологией автоматизированного управления во многих отраслях промышленности [2].

В последние несколько десятилетий за рубежом резко возрос интерес к проблемам построения высокоэффективных и высоконадежных систем диспетчерского управления и сбора данных.

С одной стороны, это связано со значительным прогрессом в области вычислительной техники, программного обеспечения и телекоммуникаций, что увеличивает возможности и расширяет сферу применения автоматизированных систем.

С другой стороны, развитие информационных технологий, повышение степени автоматизации и перераспределение функций между человеком и аппаратурой обострило проблему взаимодействия человека-оператора с системой управления. Расследование и анализ большинства аварий и происшествий в промышленности и на транспорте, часть из которых привела к катастрофическим последствиям, показали, что, если в 1960-х гг. ошибка человека являлась первоначальной причиной лишь 20% инцидентов, то в 1990-х гг. доля «человеческого фактора» возросла до 80%, причем в связи с по-

стоянным совершенствованием технологий и повышением надежности электронного оборудования и машин доля эта может еще возрасти (рис. 5.1).

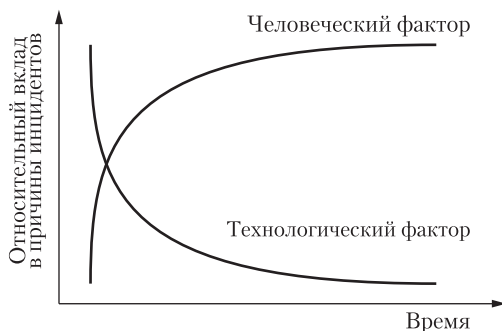


Рис. 5.1. Тенденции причин аварий в сложных автоматизированных системах

Основной причиной таких тенденций является старый традиционный подход к построению АСУ, который применяется часто и в настоящее время: ориентация в первую очередь на применение новейших технических (технологических) достижений, стремление повысить степень автоматизации и функциональные возможности системы и, в то же время, недооценка необходимости построения эффективного человеко-машинного интерфейса (*HMI* — Human-Machine Interface), т.е. интерфейса, ориентированного на оператора.

Возникла необходимость применения нового подхода при разработке таких систем, а именно ориентация в первую очередь на человека-оператора (диспетчера) и его задачи. Реализацией такого подхода и являются *SCADA*-системы, которые иногда даже называют *SCADA/HMI*.

Управление технологическими процессами на основе *SCADA*-систем стало осуществляться в передовых западных странах в 1980-е гг. В России переход к управлению на основе *SCADA*-систем стал осуществляться несколько позднее, в 1990-е гг.

SCADA-системы наилучшим образом применимы для автоматизации управления непрерывными и распределенными процессами, какими являются нефтегазовые технологиче-

ские процессы. Кроме нефтяной и газовой промышленности, SCADA-системы применяются в следующих областях:

- управление производством, передачей и распределением электроэнергии;
- промышленное производство;
- водозабор, водоочистка и водораспределение;
- управление космическими объектами;
- управление на транспорте (все виды транспорта: авиа, метро, железнодорожный, автомобильный, водный);
- телекоммуникации;
- военная область.

В мире насчитывается не один десяток компаний, активно занимающихся разработкой и внедрением SCADA-систем. Программные продукты многих из этих компаний представлены на российском рынке. Кроме того, в России существуют компании, которые занимаются разработкой отечественных SCADA-систем.

5.1.1. Определение и общая структура SCADA

SCADA — это процесс сбора информации реального времени с удаленных объектов для обработки, анализа и возможного управления этими объектами.

В SCADA-системах в большей или меньшей степени реализованы основные принципы, такие, как работа в режиме реального времени, использование значительного объема избыточной информации (высокая частота обновления данных), сетевая архитектура, принципы открытых систем и модульного исполнения, наличие запасного оборудования, работающего в «горячем резерве», и др.

Все современные SCADA-системы включают три основных структурных компонента (рис. 5.2).

Remote Terminal Unit (RTU) — удаленный терминал, осуществляющий обработку задачи (управление) в режиме реального времени.

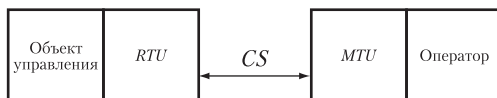


Рис. 5.2. Основные структурные компоненты SCADA-системы

Системы реального времени бывает двух типов: системы жесткого реального времени и системы мягкого реального времени.

Системы жесткого реального времени не допускают никаких задержек.

Спектр воплощения *RTU* широк — от примитивных датчиков, осуществляющих съем информации с объекта, до специализированных многопроцессорных отказоустойчивых вычислительных комплексов, осуществляющих обработку информации и управление в режиме жесткого реального времени. Конкретная его реализация определяется конкретным применением. Использование устройств низкоуровневой обработки информации позволяет снизить требования к пропускной способности каналов связи с центральным диспетчерским пунктом.

Master Terminal Unit (*MTU*) — диспетчерский пункт управления (главный терминал), осуществляет обработку данных и управление высокого уровня, как правило, в режиме мягкого реального времени. Одна из основных функций — обеспечение интерфейса между человеком-оператором и системой. *MTU* может быть реализован в самом разнообразном виде — от одиночного компьютера с дополнительными устройствами подключения к каналам связи до больших вычислительных систем и/или объединенных в локальную сеть рабочих станций и серверов.

Communication System (*CS*) — коммуникационная система (каналы связи), необходимая для передачи данных с удаленных точек (объектов, терминалов) на центральный интерфейс оператора-диспетчера и передачи сигналов управления на *RTU*.

5.1.2. Функциональная структура *SCADA*

В названии *SCADA* присутствуют две основные функции, возлагаемые на системы этого класса:

- сбор данных о контролируемом процессе;
- управление технологическим процессом, реализуемое ответственными лицами на основе собранных данных и правил (критериев), выполнение которых обеспечивает наибольшую эффективность технологического процесса.

SCADA-системы обеспечивают выполнение следующих функций:

- прием информации о контролируемых технологических параметрах от контроллеров нижних уровней и датчиков;

- сохранение принятой информации в архивах;
- обработка принятой информации;
- графическое представление хода технологического процесса, а также принятой и архивной информации в удобной для восприятия форме;
- прием команд оператора и передача их в адрес контроллеров нижних уровней и исполнительных механизмов;
- регистрация событий, связанных с контролируемым технологическим процессом и действиями персонала, ответственного за эксплуатацию и обслуживание системы;
- оповещение эксплуатационного и обслуживающего персонала об обнаруженных аварийных событиях, связанных с контролируемым технологическим процессом и функционированием программно-аппаратных средств АСУТП с регистрацией действий персонала в аварийных ситуациях;
- формирование сводок и других отчетных документов на основе архивной информации;
- обмен информацией с автоматизированной системой управления предприятием;
- непосредственное автоматическое управление технологическим процессом в соответствии с заданными алгоритмами.

Данный перечень функций, выполняемых *SCADA*-системами, не является абсолютно полным, более того, наличие некоторых функций и объем их реализации сильно варьируется от системы к системе.

5.1.3. Особенности *SCADA* как процесса управления

Существует два типа управления удаленными объектами в *SCADA*-системах: автоматическое и инициируемое оператором системы.

Процесс управления в современных *SCADA*-системах имеет следующие особенности:

- процесс *SCADA* применяется в системах, в которых обязательно наличие человека (оператора, диспетчера);
- процесс *SCADA* был разработан для систем, в которых любое неправильное воздействие может привести к отказу объекта управления или даже катастрофическим последствиям;

- оператор несет, как правило, общую ответственность за управление системой, которая при нормальных условиях только изредка требует подстройки параметров для достижения оптимальной производительности;
- активное участие оператора в процессе управления происходит нечасто и в непредсказуемые моменты времени, обычно в случае наступления критических событий (отказы, нештатные ситуации и пр.);
- действия оператора в критических ситуациях могут быть жестко ограничены по времени (несколькими минутами или даже секундами).

5.2. Аппаратные и программные средства SCADA-систем

5.2.1. Основные требования к SCADA-системам

К SCADA-системам предъявляются следующие основные требования:

- надежность системы;
- безопасность управления;
- открытость, как с точки зрения подключения различного контроллерного оборудования, так и коммуникации с другими программами;
- точность обработки и представления данных, создание богатых возможностей для реализации графического интерфейса;
- простота расширения системы;
- использование новых технологий.

Требования безопасности и надежности управления в SCADA-системах включают:

- никакой единичный отказ оборудования не должен вызвать выдачу ложного выходного воздействия (команды) на объект управления;
- никакая единичная ошибка оператора не должна вызвать выдачу ложного выходного воздействия (команды) на объект управления;
- все операции по управлению должны быть интуитивно-понятными и удобными для оператора (диспетчера).

5.2.2. Основные возможности современных SCADA-пакетов

Исходя из требований, которые предъявляются к SCADA-системам, большинству современных пакетов присущи следующие основные возможности:

- автоматизированная разработка, позволяющая создавать ПО системы автоматизации без реального программирования;
- средства сбора и хранения первичной информации от устройств нижнего уровня;
- средства обработки первичной информации;
- средства управления и регистрации сигналов об аварийных ситуациях;
- средства хранения информации с возможностью ее пост-обработки (как правило, реализуется через интерфейсы к наиболее популярным базам данных);
- средства визуализации информации в виде графиков, гистограмм и т.п.

5.2.3. Тенденции развития аппаратных и программных средств SCADA-систем

Общие тенденции

Прогресс в области информационных технологий обусловил развитие всех трех основных структурных компонент систем диспетчерского управления и сбора данных — RTU, MTU и CS, что позволило значительно увеличить их возможности; так, число контролируемых удаленных точек в современной SCADA-системе может достигать 100 000 и более. На настоящий момент значение данного параметра практически не имеет ограничений.

Основная тенденция развития технических средств (аппаратного и программного обеспечения) SCADA — миграция в сторону полностью открытых систем. Открытая архитектура позволяет независимо выбирать различные компоненты системы от различных производителей; в результате — расширение функциональных возможностей, облегчение обслуживания и снижение стоимости SCADA-систем.

Удаленные терминалы

Главная тенденция развития удаленных терминалов (*RTU*) — увеличение скорости обработки и повышение их интеллектуальных возможностей. Современные терминалы строятся на основе микропроцессорной техники, работают под управлением операционных систем реального времени, при необходимости объединяются в сеть, непосредственно или через сеть взаимодействуют с интеллектуальными электронными датчиками объекта управления и компьютерами верхнего уровня.

Конкретная реализация *RTU* зависит от области применения. Для индустриальных и транспортных систем существует два конкурирующих направления в технике *RTU* — промышленные компьютеры и программируемые логические контроллеры (в русском переводе часто встречается термин «промышленные контроллеры» (*PLC*)).

Промышленные компьютеры представляют собой, как правило, программно-совместимые с обычными коммерческими персональными компьютерами машины, но адаптированные для жестких условий эксплуатации — буквально для установки на производстве, в цехах, газокompрессорных станциях и т.п. Адаптация относится не только к конструктивному исполнению, но и к архитектуре и схемотехнике, так как изменения температуры окружающей среды приводят к дрейфу электрических параметров.

В качестве операционной системы в промышленных *PC*, работающих в качестве удаленных терминалов, все чаще начинает применяться Windows NT, в том числе различные расширения реального времени, специально разработанные для этой операционной системы. Наиболее известными поставщиками промышленных компьютеров являются американские фирмы Xycom, Octagon Systems и тайваньские Advantech, Axiom.

Промышленные контроллеры (*PLC*) представляют собой специализированные вычислительные устройства, предназначенные для управления процессами (объектами) в реальном времени. Промышленные контроллеры имеют вычислительное ядро и модули ввода-вывода, принимающие информацию (сигналы) с датчиков, переключателей, преобразователей и контроллеров и осуществляющие управление процессом или объектом путем выдачи управляющих сигналов на приводы, клапаны, переключатели и другие исполнительные

устройства. Современные *PLC* часто объединяются в сеть с помощью промышленных (индустриальных) шин (сетей), а программные средства, разрабатываемые для них, позволяют в удобной для оператора форме программировать и управлять ими или непосредственно, или через компьютер, находящийся на верхнем уровне *SCADA*-системы — диспетчерском пункте управления (*MTU*). Исследование рынка *PLC* показало, что наиболее развитыми архитектурой, программным обеспечением и функциональными возможностями обладают контроллеры фирм Siemens, Fanuc Automation, Allen—Bradley, Mitsubishi.

Много материалов и исследований по промышленной автоматизации посвящено конкуренции двух направлений — *PC* и *PLC*; каждый из авторов приводит большое количество доводов «за» и «против» по каждому направлению. Тем не менее, можно выделить основную тенденцию: там, где требуется повышенная надежность и управление в жестком реальном времени, применяются *PLC*. В первую очередь это касается применения в системах жизнеобеспечения (например, водоснабжение, электроснабжение), транспортных системах, энергетических и промышленных предприятиях, представляющих повышенную экологическую опасность. Индустриальные *PC* применяются преимущественно в менее критичных областях.

Каналы связи

Каналы связи для современных диспетчерских систем отличаются большим разнообразием. Выбор конкретного решения зависит от архитектуры системы, расстояния между диспетчерским пунктом (*MTU*) и *RTU*, числа контролируемых точек, требований по пропускной способности и надежности канала, наличия доступных коммерческих линий связи.

Тенденцией развития *CS* как структурного компонента *SCADA*-систем можно считать использование не только выделенных каналов связи, но также и корпоративных компьютерных сетей и специализированных промышленных сетей (индустриальных шин). В современных промышленных, энергетических и транспортных системах большую популярность завоевали промышленные сети — специализированные быстродействующие каналы связи, позволяющие эффективно решать задачу надежности и помехоустойчивости соединений на разных иерархических уровнях автоматизации.

Диспетчерские пункты управления

Главной тенденцией развития *MTU* является переход большинства разработчиков *SCADA*-систем на архитектуру «клиент-сервер», состоящую из четырех функциональных компонент:

1. User (Operator) Interface (интерфейс пользователя/оператора) — исключительно важная составляющая систем *SCADA*. Для нее характерны:

а) стандартизация интерфейса пользователя вокруг нескольких платформ;

б) все более возрастающее влияние Widows;

в) использование стандартного графического интерфейса пользователя (*GUI*);

г) технология объектно-ориентированного программирования;

д) стандартные средства разработки приложений, наиболее популярные среди которых — Visual Basic for Applications (*VBA*), Visual C++;

е) появление вариантов программного обеспечения класса *SCADA/HMI* для широкого спектра задач. Объектная независимость позволяет интерфейсу пользователя представлять виртуальные объекты, созданные другими системами. Результат — расширение возможностей по оптимизации *HMI*-интерфейса.

2. Data Management (управление данными) — отход от узкоспециализированных баз данных в сторону поддержки большинства корпоративных реляционных баз данных (*Microsoft SQL*, *Oracle*). Эта независимость данных изолирует функции доступа и управления данными от целевых задач *SCADA*, что позволяет легко разрабатывать дополнительные приложения по анализу и управлению данными.

3. Networking & Services (сети и службы) — переход к использованию стандартных сетевых технологий и протоколов. Службы сетевого управления, защиты и управления доступом, передачи почтовых сообщений, сканирования доступных ресурсов могут выполняться независимо от кода целевой программы *SCADA*.

4. Real-Time Servises (службы реального времени) — решают задачи реального и квазиреального времени. Данные службы управляют обменом информацией с *RTU*, осуществляя управление базой данных реального времени, оповещение

о событиях, выполняют действия по управлению системой, передачу информации о событиях на интерфейс оператора.

Операционные системы

Рынок однозначно сделал выбор в пользу операционной системы Windows. Решающими для быстрого роста популярности Windows стали ее открытая архитектура и эффективные средства разработки приложений, что позволило многочисленным фирмам-разработчикам создавать программные продукты для решения широкого спектра задач.

Рост применения Windows в АСУ обусловлен в значительной степени появлением ряда программных продуктов, которые являются расширениями Windows для реального времени (например, *RTX*).

Следует отметить, что в *SCADA*-системах требование жесткого реального времени (т.е. способность отклика/обработки событий в четко определенные, гарантированные интервалы времени) относится, как правило, только к удаленным терминалам; в диспетчерских пунктах (*MTU*) происходит обработка/управление событиями (процессами, объектами) в режиме «мягкого» (квази-) реального времени.

Прикладное программное обеспечение

Ориентация на открытые архитектуры при построении систем диспетчерского управления и сбора данных позволяет разработчикам этих систем сконцентрироваться непосредственно на целевой задаче *SCADA* — сбор и обработка данных, мониторинг, анализ событий, управление, реализация *HMI*-интерфейса.

В последнее время на рынке появилось большое количество программных продуктов класса *SCADA/HMI*, позволяющих решать специфические задачи по управлению технологическими процессами, выходящие за рамки целевой задачи *SCADA*, такие, как задачи автоматизации для дискретного производства, отдельных производственных процессов, автоматизации с использованием новейших информационных технологий и др.

Наибольших успехов в этом направлении добились компании *Intellution* и *Wonderware*.

5.3. SCADA-продукты на российском рынке

В настоящее время на российском рынке представлено несколько десятков зарубежных и отечественных SCADA-продуктов. Некоторые зарубежные SCADA-системы, известные в мире, на российском рынке пока не представлены (например, *Cube*, *Panorama*, *Cimview* и др.). Но эта ситуация может в любой момент измениться, как это произошло, например, с австралийской SCADA-системой *Citect*: система завоевала рынок Юго-Восточной Азии и Америки, в Европе рост ее продаж составил 30% в год, а в России она была неизвестна, пока российская фирма — дистрибьютор *RTSoft* не начала распространение системы на российском рынке.

В России сегодня наиболее популярны следующие зарубежные SCADA-пакеты:

- *In Touch* (Wonderware, США);
- *iFIX* (Intellution, США);
- *SIMATIC WinCC* (Siemens, Германия);
- *Citect* (Ci technologies, Австралия);
- *Wizcon* (PC Soft International, Израиль—США);
- *Sitex* и *Phocus* (Jade Software, Великобритания);
- *Real Flex* (BJ Software Systems, США);
- *Factory Link* (US Date Corp., США).

Отечественные SCADA-программы для персональных компьютеров появились в нашей стране в начале 1990-х гг. с уже привычным 10-летним запаздыванием в этой области, особенно усиленным долго преодолевавшимся недоверием к надежности и «серьезности» этих систем. Вначале на ПК создавались программы под конкретный объект и лишь затем появились универсальные решения. В настоящее время имеется около десятка отечественных SCADA-пакетов. Вот наиболее известные из них:

- *TRACE MODE* (AdAstra, Москва);
- *СКАТ* (Центрпрограммсистем, Тверь);
- *САРГОН* (НВТ-Автоматика);
- *VNS*, *GARDEN*, *Vis-a-Vis* (ИнСАТ);
- *VIORD* («Фиорд»);
- *RTWin* (*SWD* — Системы Реального Времени);
- *ЗОНД* (АСУТП Программа).

5.3.1. Интегрированный пакет комплексной автоматизации *FactorySuite*

Главное направление развития современных программных технологий управления промышленным производством — органичное сочетание на новом техническом уровне, в рамках единого «глобального» инструментария, эффективного управления промышленным процессом как таковым и неразрывно связанным с ним общим бизнес-менеджментом предприятия.

Широко распространенные как на мировом, так и на отечественном рынке *SCADA*-системы в подавляющем большинстве ответственны лишь за тот уровень промышленной автоматизации, который связан с получением данных от различных датчиков и устройств ввода-вывода, визуализацией собранной информации и ее архивированием. Доступ же к этой информации со стороны руководителя предприятия, а также руководителей экономических подразделений до недавнего времени был лишь опосредованным. Для анализа производства в целом, моделирования его отдельных этапов, выявления критических участков и слабых звеньев важен доступ к производственной информации на всех уровнях в реальном времени.

Для решений подобных задач автоматизации промышленных предприятий в целом на рынке появился ряд новейших программных комплексов, в том числе пакет *FactorySuite* американской компании Wonderware.

FactorySuite состоит из следующих основных, хорошо интегрирующихся друг с другом компонентов:

InTouch — мощная *SCADA*-система (о ней будет более подробно рассказано ниже);

InControl — инструментальная система программирования контроллеров — ПО на базе Windows NT для управления контроллерным оборудованием и процессами. Поддерживает широкий набор устройств ввода-вывода, двигателей, датчиков и другого промышленного оборудования через устоявшиеся интерфейсы и открытые промышленные сети;

InTrack — система управления производством. Позволяет наблюдать и отслеживать в реальном времени незавершенное производство, материально-технические запасы, использование оборудования, простои и т.п. Система позволяет определять и моделировать производственные процессы, контролировать исполнение заказов на продукцию;

InBatch — система гибкого управления процессами дозирования и смешивания. При помощи *InBatch* пользователи в металлургической, химической, пищевой промышленности могут моделировать свои процессы, создавать рецепты, имитировать исполнение рецептов, сопоставляя их с моделью, управлять реальным процессом, пользуясь моделью;

InSupport — это программное средство для обнаружения и устранения неисправностей и ведения технической документации. *InSupport* позволяет разрабатывать процедуры нахождения и устранения неисправностей, которые выдают четкие инструкции по обслуживанию и ремонту оборудования для операторов и обслуживающего технического персонала;

IndustrialSQL Server — реляционная база данных реального времени для внутризаводского применения, является «сердцем» промышленного набора *FactorySuite*. *IndustrialSQL Server* собирает и хранит историю о производственном процессе, позволяя работать при этом с несколькими сотнями устройств ввода-вывода и управления, а также с множеством узлов *InTouch* и *InControl*. Он объединяет эту информацию с данными о конфигурации, аварийных ситуациях и событиях, с итоговыми и статистическими данными, с историей рецептов (из *InBatch*), с данными о ходе производства (от *InTrack*) и с данными о состоянии оборудования (из *InSupport*);

Scout — средство, позволяющее просматривать технологический процесс и данные автоматизированного производства, используя удаленный доступ через сети Internet/Intranet. Может использоваться руководителями и менеджерами для просмотра информации из любой географической точки.

Кроме перечисленных пакетов в *FactorySuite* входит несколько специализированных приложений-клиентов, объединенных под названием *FactoryOffice*. Они предназначены для создания текущих и архивных трендов, параметрических графиков X-Y и табличного отображения текущих и архивных данных.

5.3.2. SCADA-система *InTouch*

SCADA-система *InTouch* считается самой продаваемой в мире. Она имеет более 200 000 инсталляций.

Недавно появилась уже восьмая версия пакета — *InTouch 8.0*.

InTouch является первым продуктом, получившим сертификат соответствия на совместимость с Windows XP («Designed for Windows XP») от Microsoft.

Программный пакет *InTouch*, как любой *SCADA*-пакет, состоит из двух основных компонентов — среды разработки и среды исполнения. В среде разработки создаются мнемосхемы, определяются и привязываются к аппаратным средствам входные и выходные сигналы и параметры, разрабатываются алгоритмы управления и назначаются права операторов. Созданное таким образом приложение функционирует в среде исполнения.

Для того чтобы приложение могло обмениваться данными с аппаратурой, необходимо использование третьего компонента — отдельной программы, называемой сервером ввода-вывода. Как правило, сервер ввода-вывода ориентирован на использование с конкретным видом оборудования, таким, как промышленные контроллеры. *InTouch* имеет большое число готовых серверов ввода-вывода — более 600. При необходимости можно также разработать новый сервер ввода-вывода с помощью инструментального средства *FactorySuite Toolkit*. Вместе с тем используются также серверы ввода-вывода, которые рассчитаны на обмен данными согласно определенным промышленным стандартам и могут работать со всеми контроллерами, удовлетворяющими этому стандарту (например, *Modbus*, *Profibus*, *DeviceNet* и др.).

InTouch можно использовать как на отдельных машинах, так и в распределенной клиент-серверной архитектуре.

База данных реального времени также имеет клиент-серверную архитектуру, она ведется только на сервере и не копируется на клиентские станции.

Исполнительная система *InTouch* поддерживает базу данных текущих значений процесса. Эти значения могут отражать заданные точки контроля устройств, представляющие параметры физического объекта, или точки, представляющие расчетные значения. Значения параметров собираются и обрабатываются на одном или большем количестве компьютеров, использующих распределенную структуру программного обеспечения. Поддерживаются следующие типы данных: переменные ввода-вывода, вещественные числа, целые числа, дискретные числа, строковые переменные (представляет собой строку символов длиной до 131 символа), суперпеременные (некоторая структура, определяющая составную переменную; суперпеременная может содержать до 64 переменных и иметь до двух уровней вложенности).

Особенностями среды разработки *InTouch* являются следующие.

1. Динамическая разработка сетевых приложений.

Динамическая разработка обеспечивает централизованное сопровождение основной копии приложения *InTouch* с помощью сетевого сервера. Каждый клиентский узел делает локальную копию разрабатываемого приложения. Это обеспечивает полное резервирование. Если сервер недоступен, клиентский узел продолжает работать, используя свою локальную копию приложения. Когда сервер становится доступным, осуществление связи с ним происходит незаметно для пользователя или программы.

Другой возможностью сетевой распределенной разработки является то, что пользователи могут получать изменения на клиентских узлах без остановки запущенного приложения *InTouch*. Система сигнализирует оператору о доступности изменений в приложении, и оператор может принять их, когда это будет удобно. При приеме будут загружены и обновлены на клиентских узлах только изменившиеся компоненты приложения.

2. Мощный редактор *QuickScript*.

С помощью редактора *QuickScript* приложения *InTouch* можно расширить и настроить в соответствии со спецификацией системы. Скрипты могут быть сконфигурированы для исполнения с многочисленными параметрами, такими, как специальные состояния процесса, изменения данных, события приложения, события окна, нажатие на клавиатуре, события *ActiveX* и другие. Среда *QuickScript* также поддерживает *QuickFunctions*, которые позволяют пользователям разработать библиотеку скриптов для дальнейшего использования.

Редактор *QuickScript* прост в использовании, и при этом позволяет пользователям полностью настраивать поведение приложения. При создании скриптов пользователь может использовать кнопки с наиболее часто используемыми выражениями и структурами, такими, как «больше чем», «меньше чем», цикл, условные конструкции («если-то-иначе»). Дополнительные функции, такие, как математические, строковые преобразования и др., доступны посредством Мастера, который запрашивает необходимые аргументы и проверяет корректность синтаксиса функций. Встроенный механизм проверки корректности позволяет пользователям проверять правильность скриптов перед их развертыванием, тем самым предотвращая появление ошибок исполнения.

3. Графический интерфейс пользователя.

InTouch предоставляет набор инструментов для графического отображения состояния процесса.

Во-первых, *объектно-ориентированная графика*. Мощные средства объектно-ориентированного проектирования облегчают рисование, расположение, выравнивание, разделение на слои, размещение в пространстве, вращение, инвертирование, дублирование, вырезание, копирование, вставку, стирание и многие другие операции. *InTouch* допускает неограниченное количество динамических изображений в каждом окне.

Во-вторых, *анимационные связи*. Эти связи обеспечивают возможность «оживления» любых объектов и их комбинаций для создания практически неограниченного набора мультипликационных характеристик, включая изменения размеров, цвета, перемещений, мигания, изменения уровня и т.д.

В-третьих, *мастер-объекты*. *InTouch* включает в себя обширную библиотеку мастер-объектов (*Wizards*), т.е. предварительно сконфигурированных вспомогательных средств (таких, как переключатели, ползунковые регуляторы и счетчики), позволяющих быстро создавать прикладные программы для конкретных условий производственного предприятия. При помощи дополнительного набора инструментальных средств (*Extensibility Toolkit*) возможно также создать собственные мастер-объекты, приспособленные к нуждам отрасли.

В-четвертых, *ActiveX*. *InTouch* является *ActiveX*, контейнером, что позволяет пользователям *InTouch* устанавливать элементы управления *ActiveX* сторонних фирм и использовать их в любом окне приложения без всякого программирования с помощью простой технологии конфигурирования «укажи и кликни».

InTouch позволяет организовать взаимодействие с другими приложениями, используя следующие средства:

- стандартный *DDE*-обмен (*Dynamic Data Exchange* — динамический обмен данными. Большинство разработанных серверов ввода/вывода поддерживают именно *DDE*-обмен для передачи данных в *InTouch*-приложение. Обычные приложения, самое популярное из которых *Excel*, также используют *DDE*-механизм;

- *OLE*-технологии (*Object Linking and Embedding* — включение и встраивание объектов). Используется для взаимодействия с некоторыми компонентами *FactorySuite* и другими пользовательскими приложениями;

- *OPC*-программы (*OLE for Process Control* — *OLE* для управления процессами). *OPC* применяется для обмена информацией с технологическими устройствами типа ПЛК.

InTouch 8.0 и все другие *FactorySuite* компоненты могут быть OPC-клиентом для работы с любым из OPC-серверов.

SCADA-система *InTouch* имеет встроенные механизмы интеграции с другими компонентами *FactorySuite*. Эти механизмы используют как указанные стандартные протоколы, так и собственный, разработанный фирмой Wonderware, протокол *SuiteLink*. В этом протоколе введена концепция меток времени и качества информации, выставляемых серверами ввода-вывода.

В целом *InTouch* удовлетворяет практически всем требованиям, предъявляемым в настоящее время к SCADA-системам.

5.3.3. SCADA-система *Citect*

Разработчиком SCADA-системы *Citect* является австралийская фирма Ci Technologies (Ci — Control Instrumentation). *Citect* — это программный пакет, созданный на основе большого опыта компании, которая более 20 лет является системным интегратором. Опыт системной интеграции вложен не только в собственно ПО, но и в «базу знаний», которая воплотилась в *help*-функциях, а также в ноу-хау в решении проблем, связанных с 300 ПЛК, поддерживаемыми этим пакетом.

При покупке SCADA-пакета первоначальные вложения, как правило, достаточно высоки. Причем среда разработки, как правило, значительно дороже, чем среда исполнения. Удивительно, но Ci Technologies предлагает пользователям систему разработки *бесплатно*, цена же системы исполнения сравнима с другими SCADA-пакетами.

Одна из характеристик *Citect* — *гибкость*, которая проявляется в нескольких чертах. Во-первых, для *Citect* естественным является режим *распределенной разработки приложений*.

Во-вторых, в *Citect* заложено *огромное многообразие подходов к разработке приложений*. Так, возможна разработка приложений без программирования вообще на основе предоставляемых библиотек графических объектов, шаблонов, драйверов и т.д. Возможна разработка приложений с использованием программирования в большей или меньшей степени. При этом, в зависимости от профессиональных навыков разработчика, приложение можно создавать как с помощью языка пакета *Citect*, называемого Cicode, так и более знакомых, традиционных языков программирования (Visual Basic, C).

Иногда сложно предусмотреть детальную топологию проекта с распределением функциональных возможностей по узлам. В *Citect* предусмотрено простое наращивание дополнительных узлов проекта и возможность перераспределения их функций. Выполняются такие процедуры в процессе конфигурирования каждого узла.

Указанные выше особенности данного пакета особенно важны, когда *SCADA*-пакет используется впервые, поскольку не требуют больших финансовых вложений, с одной стороны, а с другой — позволяют проанализировать все возможности системы (не демо-версии!).

Citect используется как 32-разрядное приложение Windows NT, Windows 95 и Windows 98. Сбор данных, формирование алармов и построение трендов может происходить одновременно с редактированием и компиляцией. Ядро пакета является многозадачным ядром реального времени с вытеснением задач по приоритетам.

Для каждого нового проекта в *Citect* автоматически создается файловая структура в формате dbf. Для хранения данных каждого проекта инициализируется около 60 файлов. Под каждую задачу проекта отведен «свой» файл (например, файл дискретных алармов, файл аналоговых алармов, файл переменных проекта, файл графических страниц и т.д.). Эти файлы могут отдельно импортироваться в Excel для редактирования или документирования.

Citect ориентирован на реализацию архитектуры клиент-сервер и имеет в своем составе пять функциональных модулей (серверов или клиентов):

- *I/O* — *сервер ввода-вывода*. Обеспечивает передачу данных между физическими устройствами ввода-вывода и другими модулями *Citect*;
- *Display* — *клиент визуализации*. Обеспечивает операторский интерфейс: отображение данных, поступающих от других модулей *Citect*, и управление выполнением команд оператора;
- *Alarms* — *сервер алармов*. Отслеживает данные, сравнивает их с допустимыми пределами, проверяет выполнение заданных условий и отображает алармы на соответствующем узле визуализации;
- *Reports* — *сервер отчетов*. Генерирует отчеты по истечении определенного времени, при возникновении определенного события или по запросу оператора;

- *Trends* — сервер трендов. Собирает и регистрирует трендовую информацию, позволяя фиксировать развитие процесса в реальном времени или ретроспективно в окне трендов или в файле.

Каждый функциональный модуль *Citect* исполняется как отдельная задача независимо от того, исполняются ли модули на одном компьютере или на разных. Поэтому *Citect* позволяет строить архитектуры различной сложности.

Простейшая архитектура состоит из одного компьютера (узла), на котором работают все модули. Если в больших прикладных системах этот узел становится перегруженным, то серверы (*I/O*, *Alarms*, *Trends*, *Reports*) могут устанавливаться на разных узлах. А если задача сервера ввода-вывода перегружает узел, то можно увеличить число серверов ввода-вывода. Все узлы визуализации могут осуществлять доступ ко всем серверам через сеть. *Citect* поддерживает *NetBIOS*, *TCP/IP* и другие сетевые протоколы. Одновременно могут исполняться несколько протоколов.

Citect поддерживает аппаратные и конфигурируемые алармы.

Аппаратные алармы призваны информировать оператора о неисправностях, возникающих в устройствах системы управления (контроллерах, модулях ввода-вывода, каналах связи и др.).

Алармы, вызываемые отклонениями технологических параметров за допустимые границы, неисправностью технологического оборудования, надо предварительно конфигурировать. Система *Citect* позволяет конфигурировать алармы по отдельным переменным, по группам переменных, по выражениям, по результатам расчетов и т.д. Различают четыре вида конфигурируемых алармов:

- цифровые алармы, возникают в ответ на изменение состояния;
- аналоговые алармы, базируются на анализе выхода за указанные верхние и нижние пределы, отклонении от нормы, превышении пределов скорости изменения;
- алармы с метками времени, базируются на таймере, который работает в контроллере и регистрирует алармы с точностью до миллисекунд. Метка времени обычно используется для изучения тревожных ситуаций, когда одновременно возникает целый ряд алармов. С помощью метки времени можно выявить последовательность возникновения алармов;

- составные алармы, возникающие в результате комбинации событий.

Язык программирования *Cicode* поддерживает простой набор операторов, с помощью которых можно генерировать отчет и задавать его шаблон. Как правило, отчеты генерируются в некоторые моменты времени, задаваемые таймерами и счетчиками. Можно также задавать событие, которое запускает генерацию отчета и уровень привилегированности пользователя, определяющий права пользователя на запуск генерации отчетов. Можно также генерировать отчеты в Excel с помощью *DDE*-связей. В *Citect* есть и электронная почта, по которой отчеты могут посылатся.

Еще одним отличительным свойством *Citect* является то, что среди стандартных функций здесь предусмотрено дублирование. Сервер ввода-вывода может дублироваться с помощью резервного сервера ввода-вывода, на котором выполняется та же самая прикладная задача. При отказе основного сервера резервный сервер продолжает работу без какой-либо потери информации.

Могут также дублироваться серверы трендов, отчетов и алармов. Дублирование возможно и на уровне сети. Это делается установкой в компьютере двух сетевых карт и организацией дублированной связи с контроллерами.

Утилита «*Computer setup*» («Установка компьютера») позволяет конфигурировать компьютер как узел визуализации (клиент), как основной или резервный сервер ввода-вывода, сервер алармов, трендов или отчетов. Она также позволяет конфигурировать временную синхронизацию и запрещение срабатывания определенных клавиш.

В *Citect* встроены гибкий язык программирования *Cicode*, сравнимый по возможности с языками Pascal, C. Именно на нем написана сама *SCADA*-система. *Cicode* позволяет создавать программы любой степени сложности. Язык *Cicode* поддерживает, например, 40 операторов для управления алармами, 19 операторов для работы с файлами, 18 *SQL*-функций, 50 операторов для организации работы с трендами и множество других. Исходный файл на *Cicode* создается редактором и компилируется вместе с проектом.

Проект всегда компилируется с системой исполнения. Во время компиляции проверяются все *dbf*-файлы, транслируется *Cicode*.

Во время исполнения системы может активизироваться специальное ядро, которое поддерживает команды мони-

торинга контроллеров и сетевых взаимодействий, проверки загрузки центрального процессора, проверки ошибок и т.д.

Графические объекты на дисплеях оператора можно построить с помощью графического редактора (Graphics Builder). *Citect* поддерживает неограниченное количество окон — «страниц». Для их создания предлагается использовать библиотеку шаблонов. Для упрощения создания графических объектов на странице поставляются три библиотеки — объектов, джинов и суперджинов. Объекты — это статические картинки, классифицированные по группам, таким, как механизмы, резервуары, насосы и т.д. Джины и суперджины — это динамические объекты, к ним могут прикрепляться различные переменные.

Часто при разработке графического интерфейса приходится создавать типовые группы объектов, предназначенные для решения конкретной задачи. Например, группа из трех объектов (кнопка «ПУСК», кнопка «СТОП» и индикатор состояния — лампочка зеленого/красного цвета) предназначена для пуска/останова насоса, электродвигателя и т.д. с индикацией их состояния. Тогда каждый раз для решения этой задачи разработчику придется создавать эти три объекта и конфигурировать их (задавать свойства). Но таких задач на одной графической странице может оказаться много. Очевидно, что время специалиста в этом случае будет расходоваться неэффективно. Для решения подобных задач *Citect* предлагает механизм, названный джином. Несколько связанных объектов объединяются в группу, группа сохраняется в библиотеке джинов, которая устроена аналогично библиотеке объектов. Джин может управляться как единый объект (его можно копировать, перемещать, масштабировать и т.д.). Теперь на решение вышеописанной задачи уйдет гораздо меньше времени. Надо лишь выбрать требуемого джина из библиотеки и вставить в графическую страницу.

С помощью суперджина реализуется такой же механизм, но только по отношению не к группе объектов, а к целой странице.

Объекты типа джин и суперджин позволяют экономить дисковое пространство компьютера, так как в его памяти хранится лишь одна копия.

5.3.4. SCADA-системы *FIX* и *iFIX*

SCADA-системы с общим названием *FIX* (Fully Integrated Control System) выпускает фирма Intellution, основанная в 1980 г. Она занимает заметное место на рынке *SCADA*-систем всех развитых стран. Сначала выпускались пакеты под DOS, затем для различных версий Windows. Сейчас продолжают развиваться только 32-разрядные пакеты, работающие на платформах Windows 95/98/NT/2000/XP. В настоящее время под управлением пакетов *FIX* в мире работает свыше 150 000 компьютеров практически во всех отраслях промышленности, включая ядерные электростанции и нефтепроводы.

Вся группа 32-разрядных продуктов разделена на два семейства: семейство *FIX* и семейство *iFIX*. Оба семейства содержат ряд функционально аналогичных пакетов:

- *SCADA*-пакет *FIX* (*iFIX*);
- *FIX VisualBatch* (*iBatch*) — программное обеспечение, предназначенное для автоматизации периодических серийных процессов;
- *FIX WEB Server* (*iWeb Server*) — Internet-пакет для дистанционного наблюдения в реальном времени за контролируемым технологическим процессом;
- *FIX Broadcast Network* (*iWebCast*) — Internet-пакет для автоматической пересылки данных на настольный компьютер;
- *FIX Paradym-31* (*iLogic*) — программный пакет для управления контроллерами на основе персональных компьютеров.

Кроме перечисленных в семействе *FIX* имеется пакет:

- *FIX PlantTV* — универсальное средство просмотра данных, осуществляющее доступ к поступающей в реальном масштабе времени информации от разнообразных источников: архивных файлов, *DDE*-серверов, записанного и прямого видеоизображения, от реляционных баз данных и т.д.

А в семействе *iFIX*:

- *iHistorian* — исторический архив предприятия;
- *infoAgent* — web-клиент, предназначенный для представления и анализа данных *iHistorian*;
- *iClientTS* — ПО для поддержки многосессионной и многопользовательской терминальной работы с *iFIX* на платформе Windows 2000/XP. Работа клиента в терминальном режиме осуществляется через web-браузер и практически ничем не

отличается от работы обычного клиента, при этом не требуется установки дополнительного ПО на клиентский компьютер;

- *VisiconX* — объект *ActiveX* для доступа к реляционным БД по протоколу *OLEDB* (начиная с версии 2.5 включен в состав *iFIX*;

- *iDowntime* — программное обеспечение для выявления и минимизации простоев оборудования;

- *iVisualize* — средство создания человеко-машинного интерфейса на платформе Windows CE.

Главное отличие между этими родственными семействами заключается в том, что *FIX* состоит из отдельных 32-разрядных приложений, обменивающихся между собой по внутренним интерфейсам, а *iFIX* построен на современной компонентно-объектной архитектуре. В *iFIX* реализован улучшенный интерфейс среды разработки, поддерживается объектная модель графических форм и многое другое, благодаря чему значительно повышены возможности контроля и отображения процессов.

Узлы разных семейств могут совместно использоваться в сети.

Пакет *FIX* состоит из двух типов узлов — узлов-серверов и узлов чистых клиентов. Серверы *FIX* (называющиеся *SCADA* или *HMI*) поддерживают связь с контроллерами и ведут базу данных реального времени. Клиенты (называются *View Client*) отображают экранные формы и реализуют диалог АРМ.

Серверы и клиенты могут иметь модификацию *Development* (Разработка) или *Runtime* (Исполнение). Модификация *Development* позволяет разрабатывать проект, в том числе в «горячем» режиме (без отключения *SCADA*-системы), и исполнять его. Модификация *Runtime* поддерживает только среду исполнения.

SCADA-пакет *iFIX* состоит их следующих типов узлов: «слепых» серверов, т.е. серверов без функций АРМ (без поддержки экранных форм), серверов (*SCADA*-серверы), клиентов (*i-Client*) и узлов *HMI Pak*, соединяющих функции серверов и клиентов. *SCADA*-серверы *iFIX* имеют модификацию только *Runtime*, а узлы *i-Client* и *HMI Pak* могут быть типа *Development* или *Runtime*.

Особенность архитектуры пакетов *FIX* и *iFIX* состоит в том, что база данных реального времени является истинно распределенной. В отличие от псевдораспределенной базы данных, когда клиент фактически связывается с сосредоточенной локальной базой данных, копируемой с удаленных серверов на

машину клиента, в архитектуре *FIX* узлы-клиенты не ведут локальных копий баз данных. Они получают только сообщения, тревоги и отображаемую в экранных формах информацию в соответствии со своей конфигурацией. Такая архитектура не накладывает ограничений на соединение серверов и клиентов, снижает нагрузку на сеть, облегчает масштабирование системы и повышает ее надежность.

Разработка проекта включает следующие основные этапы: настройка драйверов на обмен данными с контроллерами, построение базы данных, создание экранных форм, разработка стратегий генерации тревог и ограничения доступа. Практически все эти этапы можно реализовать без программирования, а лишь путем конфигурирования приложений. Только для нестандартных функций в экранных формах и для организации обработки событий может потребоваться написание сравнительно несложных скриптов.

Проекты в *FIX* и *iFIX* отличаются друг от друга. Пакет *iFIX* в отличие *FIX* имеет новые возможности визуализации на узле-клиенте:

- новый дизайн среды разработки *Intellution Workspace* с деревом проекта, иерархией экранных объектов, настраиваемыми панелями инструментов и другими возможностями;
- каждый элемент экранной формы *iFIX* — это объект со свойствами, методами и событиями, к которым есть доступ как на этапе конфигурирования, так и на этапе выполнения;
- *Workspace* является *ActiveX*-контейнером, причем с безопасным внедрением (это означает, что собой внедренного *ActiveX*-элемента не приведет к останову системы в целом);
- *Workspace* может являться *OPC*-клиентом и получать информацию не только от своей базы данных, но и от любого *OPC*-сервера;
- одно из важнейших отличий состоит в том, что язык скриптов в экранных формах *iFIX* — это стандартный язык Visual Basic for Applications (*VBA*). С помощью *VBA* можно реализовать любые анимационные эффекты.

Кроме того, в *iFIX* есть новая подсистема *Scheduler* (Планировщик), который по времени или по событиям может запускать программы на *VBA*.

Для разработчика проект на *iFIX* по сравнению с проектом на *FIX* означает большую «прозрачность» экранных форм благодаря применению дерева проектов и стандартному языку *VBA*; большую гибкость и мощность анимации и др.

При регистрации событий в SCADA-пакетах *Intellution* применяется два вида понятий — тревоги и сообщения. Сообщения (message) содержат некритическую информацию, которая не требует вмешательства операторов. Тревога (alarm) — это сообщение о потенциально опасных изменениях в процессе, которое требует реакции оператора. Наиболее универсальным средством отображения тревог на экране оператора является специальный объект — «Сводка тревог». Он позволяет просматривать и квитировать тревоги, отображать их приоритет цветом и др.

Тревоги и сообщения рассылаются адресатам тревог, к которым относятся, например, принтеры, файлы, объекты сводки тревог и др. В *iFIX* по сравнению с *FIX* есть дополнительный адресат тревог — реляционная база данных, куда тревоги передаются посредством *ODBC*-драйвера.

Система тревог имеет следующие характеристики. К стандартным тревогам аналоговых блоков относятся шесть типов тревог: тревоги верхняя и нижняя предупредительные, верхняя и нижняя критические, по скорости изменения и по отклонению от заданного значения. Дискретные блоки могут быть настроены на подачу тревог в случае изменения значения (с 0 на 1 и/или наоборот). Кроме того, при потере связи с объектом возникает соответствующая тревога.

5.3.5. SCADA-система SIMATIC WinCC

SCADA-система *WinCC* разработана компанией Siemens.

В настоящее время этот программный продукт занимает первое место в Европе среди SCADA-систем и третье место в мире. В 1999 г. появилась пятая версия этой системы. Она базируется на операционных системах Windows 95/98/NT, является открытой и масштабируемой.

Открытость *WinCC* поддерживается на всех уровнях работы системы за счет использования открытых интерфейсов и доступности внутренних структур.

Обмен данными с другими приложениями осуществляется при помощи механизмов *DDE*, *OLE*, *ODBC/SQL*, с контроллерами — при помощи *OPC*. При отсутствии в *WinCC* нужного драйвера для выбранного ПЛК разработчик может создать свой драйвер, используя Channel Development Kit (*CDK*).

WinCC предлагает максимум возможностей разработчику для написания своих дополнений. Разработчик получает доступ к внутренним структурам, процедурам и функциям компонен-

тов системы. Описание этих функций поставляется специально отдельной опцией Open Development Kit (ODK).

В *WinCC* реализована возможность просмотра состояния объекта через Internet с помощью *WinCC Web Navigator Server*.

Система *WinCC* может использоваться как в однопользовательском варианте, так и в клиент-серверном. К *WinCC*-серверу, принимающему данные с ПЛК, может быть подключено до 16 *WinCC*-клиентов. В *WinCC* 5.0 поддерживается до шести серверов.

Набор опций системы *WinCC* определяется заказчиком. Установка отдельных опций требует дополнительных лицензий.

В основной комплект поставки *WinCC* входят следующие опции:

- *Alarm Logging* — для подготовки, отображения, квитирования и архивирования сообщений;
- *User Administrator* — для управления доступом к ресурсам *WinCC*;
- *Text Library* — позволяет создавать библиотеку соответствий между словами для переключения языков;
- *Report Designer* — встроенный генератор отчетов;
- *Global Scripts* — редактор, с помощью которого можно писать C-функции для обработки событий;
- *Tag Logging* — система архивирования данных. Совместно с редактором предоставляются средства для табличного и графического отображения значений в базе данных;
- *Graphics Designer* — редактор для рисования мнемосхем.

Все редакторы запускаются из центрального приложения *WinCC* — *Control Center*. *Control Center* выполняет роль менеджера всех опций *WinCC* и является для них связующим звеном. Каждая опция состоит из системы разработки и системы исполнения.

Служба сообщений *Alarm Logging* предназначена для вывода сообщений о ходе контролируемого технологического процесса, подтверждения сообщений оператором и ведения архивов этих сообщений. Например, это могут быть сообщения о выходе параметров за уставочные значения, сообщения о входе пользователей в систему и т.д.

Опция состоит из двух частей — системы разработки и системы исполнения. Система разработки служит для задания таких параметров сообщения, как условия их возникновения,

тексты, цвета и т.д., а также для задания параметров архива сообщений. Система исполнения предназначена для вывода сообщений на экран и их архивирования во время работы *WinCC*-приложения в хронологическом порядке.

Каждое сообщение имеет блочную структуру. В сообщении могут входить системные блоки, блоки данных и блоки информации, определяемой пользователем. Системные блоки содержат такую информацию, как время, дата и номер сообщения; блоки данных — значения контролируемых параметров; блоки информации, определяемой пользователем, — общую характеристику сообщения: текст сообщения, место возникновения неисправности и т.д.

Для каждого окна, предназначенного для отображения сообщений, может быть задан определенный фильтр, который позволяет отображать в окне только часть сообщений, например, относящихся к определенному участку технологического процесса.

Архивирование сообщений может происходить в режиме кольцевого буфера, когда указывается максимальное количество сообщений в архиве (до 10 000) и в случае переполнения буфера перезаписывается самое старое сообщение. Также для архивирования может быть использовано все доступное дисковое пространство.

Служба *User Administrator* предназначена для контроля прав доступа пользователей *WinCC*-приложения. Каждому пользователю могут быть присвоены определенные «уровни доступа». Максимально возможное количество уровней доступа — 999. При входе в любой *WinCC*-редактор, как в режиме конфигурирования, так и во время выполнения *WinCC*-приложения, проверяется, зарегистрирован ли пользователь в системе и какие уровни доступа он имеет. Если пользователь не зарегистрирован, то он не имеет никаких прав. Если пользователь зарегистрирован, то проверяется соответствие его уровня доступа уровню доступа запрашиваемой функции. При различии в уровнях доступа функция не может быть вызвана.

Редактор *Text Library* предназначен для создания библиотеки соответствий слов или символов. Это необходимо, когда текст может отображаться на двух или более языках. Если нужно, чтобы *WinCC*-приложение в процессе работы могло поддерживать, например, два языка — английский и русский, то этот редактор поможет в создании и использовании соответствий. Кроме того, *Text Library* хранит тексты

сообщений, которые подготавливаются в *Alarm Logging*, т.е. текст сообщений также может быть на разных языках.

Встроенный генератор отчетов *Report Designer* состоит из редактора схемы отчетов и системы генерации отчетов. Графический редактор схемы отчетов позволяет спроектировать вид отчета. В подготовке схемы отчета помогают готовые схемы.

Отчеты могут содержать как системную информацию (т.е. атрибуты конфигурации, данные о проекте), так и информацию из архивов (т.е. протоколы сообщений и измеряемые значения) в виде таблиц или графиков.

Для создания отчета используются динамические объекты, которые наполняются данными во время исполнения. Для вывода отчета необходимо задать, по какому событию начинать генерацию отчета и куда будет выводиться отчет. Генератор отчетов позволяет осуществить выбор следующих событий:

- по требованию пользователя;
- в заранее выбранное время;
- циклический вывод.

Для организации вывода предлагаются следующие варианты:

- вывод на экран;
- вывод на выбранный принтер;
- вывод в файл.

Подсистема обработки событий *Global Scripts* — это общее название для *C*-функций и обработчиков событий во всем *WinCC*-проекте. Различают следующие типы функций:

- функции проекта — эти функции пишутся пользователем для конкретного проекта;
- стандартные функции — содержат функции *WinCC API*, которые отсортированы по опциям;
- внутренние функции — это наиболее часто используемые функции, которые позволяют динамически изменять и позиционировать изображение, принимать и изменять значения параметров. Внутренние функции также содержат стандартные функции языка *C*;
- обработчики событий — это функции, которые могут использовать все вышеперечисленные функции в теле своей программы. Обработчики событий срабатывают либо по изменению некоторого параметра либо через определенный промежуток времени. Кроме того, обработчики событий можно создавать внутри *Graphics Designer* для любого графического

объекта (например, по нажатию клавиши клавиатуры или мыши на область объекта будет срабатывать определенный скрипт).

Подсистема архивации параметров *Tag Logging* предназначена для создания оперативных и долговременных архивов. В *WinCC* существует три типа архивов:

- *Process Value Archive* — основной архив для регистрируемых параметров (тегов), позволяющий создавать в оперативный или долговременный архив с заданными методами архивирования;

- *Compressed Value Archive* — сжатый архив, базирующийся на *Process Value Archive*, содержит статистические данные за заданный промежуток времени и с заданным методом обработки;

- *User Archive* — позволяет создавать свои таблицы со своими полями и выполнять действия над ними из скриптов *Global Scripts*. Основное назначение *User Archive* — это подготовка рецептов. *User Archive* поставляется отдельной опцией *WinCC*.

Графический редактор *Graphics Designer* предназначен для создания мнемосхем. Он содержит богатую библиотеку стандартных графических объектов, библиотеку Windows-компонентов — кнопок, списков и т.д., а также библиотеку сложных *WinCC*-объектов — полей вывода параметров, рисунков, создаваемых пользователем и т.д.

Для каждого объекта определен набор свойств, которые могут меняться во время выполнения приложения. В качестве примера можно привести следующие свойства: положение на экране, длина, ширина, шрифт, цвет шрифта, процент заполнения, цвет заполнения, мигание, частота мигания и т.д. Также для объекта определен набор событий, на которые этот объект может реагировать во время выполнения приложения.

Graphics Designer поддерживает технологию *OLE 2.0*, что позволяет встраивать в мнемосхемы компоненты *ActiveX*, разработанные пользователем.

Для облегчения задач выполнения *WinCC*-проектов *WinCC* постоянно пополняется новыми опциями. Для версии *WinCC 4.02* этот список состоит из следующих основных опций:

- *Split Screen Manager* — позволяет быстро создать шаблон *WinCC*-приложения для просмотра экранов *WinCC*-клиентов, подключенных к системе;

- *Alarm Logging Wizard* — программа для проектирования структуры строки сообщений, а также звуковых сигналов при выводе того или иного типа сообщений;
- *Picture hierarchy* — эта программа предлагает удобный просмотр картинок (созданных в *Graphics Designer*) в виде структуры «дерево»;
- *Life beat Monitoring* — позволяет следить за состоянием соединений всех ПЛК, подключенных к системе;
- *Tag Editor* — программа используется для связи тегов с программой создания трендов в режиме исполнения;
- *Time synchronization* — программа синхронизации времени, обеспечивает формирование сообщений в одинаковом хронологическом порядке для всей системы;
- *Chip Card* — программа для поддержки авторизованного доступа к ресурсам *WinCC* с помощью пластиковых карт;
- *Storage* — программа, позволяющая перемещать данные, накопленные в долговременных архивах, на другие накопители, а также удалять устаревшие данные с указанием времени или в зависимости от процента заполнения диска.

5.3.6. SCADA-система TRACE MODE

TRACE MODE для Windows — это российский SCADA-продукт, разработанный фирмой AdAstra Ltd. С его помощью можно не только разрабатывать распределенные АРМ операторов технологического процесса, но и запрограммировать контроллеры, а также связать АСУТП с корпоративной информационной системой предприятия и глобальной сетью *Internet* [8].

TRACE MODE основана на *DCOM* — базовой 32-разрядной технологии корпорации Microsoft, положенной в основу всех ее современных продуктов, начиная от Windows NT и заканчивая Office 2000. Взаимодействие между компонентами *TRACE MODE* в *Internet* также осуществляется через *DCOM* с использованием основных стандартов *Internet/Intranet* (например, *TCP/IP*, *HTML* и т.д.).

Система разработки *TRACE MODE* содержит ряд новых технологий проектирования АСУТП, отличающих ее от других SCADA-систем. Среди них следующие:

- обеспечение единых инструментальных средств (единой линии программирования) как для разработки операторских станций, так и для программирования контроллеров;

- разработка распределенной АСУТП как единого проекта;

- технология автопостроения проекта.

Традиционно SCADA-системы понимались как инструмент разработки программного обеспечения для рабочих мест диспетчеров, т.е. для верхнего уровня АСУТП.

Программирование промышленных контроллеров или интеллектуальных датчиков производилось иными программными средствами или специальными программаторами, поставляемыми с оборудованием. После появления и массового распространения IBM PC-совместимых контроллеров появилась возможность унифицировать программное обеспечение для операторских станций и промышленных контроллеров.

Эта возможность реализована в системе *TRACE MODE 4.20*, в которую введены функции программирования контроллеров и выпущена специальная исполнительная система для контроллеров — Микро МРВ.

В последующих версиях *TRACE MODE* технология сквозного программирования была усовершенствована. Наибольшие изменения коснулись средств разработки. Были разработаны язык схем на функциональных блоках (Техно *FBD*) и язык инструкций (Техно *IL*), которые являются языками визуального программирования и включают более 150 элементарных и библиотечных функций. Среди встроенных алгоритмов — ПИД, ПДД, нечеткое, позиционное регулирование, динамическая балансировка, алгоритмы массового обслуживания, блоки моделирования объектов, арифметические, алгебраические, тригонометрические, статистические функции, функции расчета технико-экономических показателей и т.д. Добавлен ряд функциональных блоков, ориентированных на контроль и управление типовыми технологическими объектами (клапан, задвижка, привод и т.д.). Также разработаны алгоритмы адаптивных и модальных регуляторов.

В распределенных SCADA-системах разработка проекта привязана к одной операторской станции. Поэтому при разработке сетевых комплексов сначала создаются базы данных реального времени для отдельных ПК, и лишь потом они объединяются в сеть.

Однако современные промышленные АСУ «живут» и развиваются десятки лет, имеют тенденцию к интеграции как между собой, так и с АСУ финансово-хозяйственных служб. За это время меняется технология, добавляются и заменяются датчики, АРМ, модифицируется программное обеспечение

АСУ. Поддерживать и развивать системы, состоящие их многих обособленных ПК и контроллеров, каждый из которых ничего не «знает» о других, и трудно, и дорого. Чтобы этого избежать, можно использовать архитектуру клиент-сервер, но сосредоточение базы данных реального времени на сервере снижает надежность системы (что будет, если сервер откажет?).

В *TRACE MODE 6* распределенная АСУ, включающая и ПК и контроллеры, *рассматривается как один проект*. Поэтому каждый узел (ПК или контроллер) имеет информацию об остальных узлах системы и в случае его модификации автоматически обновляет соответствующие базы на других узлах. При этом АСУ можно создавать как в архитектуре клиент-сервер, так и распределенную — технология разработки АСУТП как единого проекта будет одинаково эффективна.

Технология автопостроения — это группа оригинальных технологий, реализованных в ТРЕЙС МОУД 5 и последующих версиях. Суть автопостроения заключается в автоматическом генерировании баз каналов операторских станций и контроллеров, входящих в проект АСУТП на основе информации о числе точек ввода /вывода, номенклатуре используемых контроллеров и УСО, наличии и характере связей между ПК и контроллерами. В соответствии с этим в ТРЕЙС МОУД 5 реализованы следующие возможности.

- «Автопостроение» баз каналов для связи с УСО в РС-контроллерах. Пользователю достаточно указать марку и количество РС-контроллеров, используемых в проекте и запустить «Автопостроение» — ТРЕЙС МОУД сформирует базу каналов для каждого контроллера и произведет настройку на УСО автоматически.

- «Автопостроение» баз каналов для связи с обычными контроллерами. Эта процедура автоматически генерирует базы каналов операторских станций и производит настройку на наиболее распространенные в России контроллеры.

- «Автопостроение» связей между узлами «ПК — ПК», «ПК — контроллеры», «контроллеры — контроллеры» осуществляет создание, автоматическое поддержание и обновление коммуникаций между узлами распределенной АСУТП.

- «Автопостроение» при импорте баз технологических параметров. В наиболее технологически «культурных» организациях разработке проекта предшествует его детальная проработка и составление баз технологических параметров. Часто для этих целей используются распространенные базы

данных и электронные таблицы, например, Excel, Access и др. ТРЕЙС МОУД 5 допускает импорт этих баз с последующим автопостроением.

Технология автопостроения является революционным шагом в разработке систем реального времени, так как снимает огромную часть рутинной работы по «набивке» и конфигурированию баз параметров. Благодаря автопостроению разработка АСУТП сводится к следующим несложным процедурам:

- размещение в рабочем поле редактора базы каналов иконок контроллеров и операторских станций;
- указание наличия информационного обмена между узлами;
- запуск автопостроения проекта;
- задание математической обработки данных и алгоритмов управления.

Разработка графического интерфейса операторских станций осуществляется в объектно-ориентированном редакторе представления данных. Графические изображения создаются в векторном формате. Редактор дает возможность создания объемных изображений мнемосхем технологических объектов. Формы динамизации содержат все необходимые элементы, в том числе гистограммы, графические, цветовые и звуковые сигнализаторы, тренды, бегущие дорожки, мультипликацию. Предусмотрен также обширный набор библиотек технологических объектов.

Если имеющихся динамических форм отображения недостаточно, пользователь может написать собственные формы как компоненты *ActiveX*, используя Visual Basic, Visual C++ и др., и встроить их в ТРЕЙС МОУД. Кроме того, в мире созданы десятки готовых бесплатных и коммерческих *ActiveX*-программ, доступных, в частности, через Интернет. Среди них — электронные таблицы, программы доступа к базам данных, географические карты, графики и т.д.

Формы отображения могут объединяться в *графические объекты*. Графические объекты включают в себя неограниченное количество статичных элементов рисования и динамических форм отображения. Они вставляются в экраны в виде одного элемента, могут использоваться в будущих проектах или на других экранах текущего проекта.

ТРЕЙС МОУД позволяет создавать многоуровневые, иерархически организованные, резервированные АСУТП. Рассмотрим трехуровневую систему, включающую уровень

контроллеров, диспетчерский уровень и административный уровень.

АСУТП уровня контроллеров создается на основе микромонитора реального времени (микро-МРВ). Эта программа размещается в *PC*-контроллере и осуществляет сбор данных с объекта, программно-логическое управление технологическими процессами и регулирование параметров по различным законам, а также ведение локальных архивов. Программа ведет постоянный контроль работоспособности УСО, сетевых линий, и в случае их выхода из строя автоматически переходит на резервные средства. При помощи микро-МРВ можно создавать дублированные или троированные системы с горячим резервом.

Основу диспетчерского уровня управления составляют Мониторы реального времени (МРВ). МРВ ТРЕЙС МОУД — это сервер реального времени, осуществляющий прием данных с контроллеров, управление технологическим процессом, перераспределение данных по локальной сети, визуализацию информации, расчет ТЭП и статистических функций, ведение архивов.

На административном уровне АСУТП используются модули *Supervisor*.

Supervisor предоставляет руководителю информацию о ходе и ретроспективе технологического процесса, статистических и технико-экономических параметрах предприятия. Эта информация может обновляться в режиме, близком к реальному времени (задержка 10–30 с). Кроме того, *Supervisor* дает возможность просматривать ретроспективу (осуществлять «плейбек») процесса как фильм на видеоманитоне. Графический «плейбек» архива дает в руки руководителя инструмент контроля работы диспетчерского комплекса и всего предприятия в целом.

ТРЕЙС МОУД — одна из немногих на российском рынке *SCADA*-систем для операционных систем общего назначения, обладающих системой *единого сетевого времени* (кроме нее еще *Citect*). Все процессы в сетевых комплексах ТРЕЙС МОУД автоматически синхронизируются, что позволяет однозначно привязывать технологические события к временной шкале, каким бы из 256 сетевых ПК они ни были зафиксированы.

Литература

1. Автоматизация технологического оборудования микроэлектроники : учеб. пособие для вузов по приборостроительной специальности / А. А. Сазонов [и др.]; под ред. А. А. Сазонова. — М. : Высшая школа, 1991. — 334 с.
2. *Деменков, Н. П.* SCADA-системы как инструмент проектирования АСУТП : учеб. пособие. — М. : изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 328 с.
3. *Кирюшин, О. В.* Управление техническими системами : учеб. пособие. — Уфа : изд-во УГНТУ, 2005. — 170 с.
4. *Корнилов, Р. В.* Основы управления технологическим оборудованием и промышленными роботами : учеб. пособие: — М. : изд. МИЭТ, 1992. — 178 с.
5. *Корнилов, Р. В.* Основы автоматизации. Линейные системы управления одной переменной : учеб. пособие. — М. : изд. МИЭТ, 1991. — 136 с.
6. Микропроцессорное управление технологическим оборудованием микроэлектроники : учеб. пособие / А. А. Сазонов [и др.]; под ред. А. А. Сазонова. — М. : Радио и связь, 1988. — 264 с.
7. *Парфенов, О. Д.* Технология микросхем : учеб. пособие. — М. : Высшая школа, 1986. — 320 с.
8. Руководство пользователя Trace Mode 5.0. — М. : Фирма Adastra, 2003. — 909 с.

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: red@urait.ru

**Новые издания и дополнительные материалы доступны
в электронной библиотечной системе «Юрайт»
biblio-online.ru**

Учебное издание

**Щагин Анатолий Васильевич,
Демкин Василий Иванович,
Кононов Владислав Юрьевич,
Кабанова Алла Борисовна**

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие для академического бакалавриата

Формат 60×90¹/₁₆.
Гарнитура «Petersburg». Печать цифровая.
Усл. печ. л. 8,56. Заказ №

ООО «Издательство Юрайт»
111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru