



**Уральский  
федеральный  
университет**

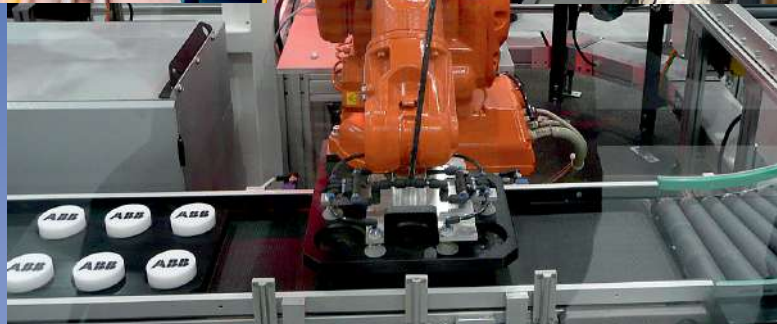
имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Институт радиоэлектроники  
и информационных  
технологий**

**А. А. СТАРОСТИН  
А. В. ЛАПТЕВА**

# ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**А. А. Старостин**

**А. В. Лаптева**

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ**

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом УрФУ  
для студентов, обучающихся по программе бакалавриата  
по направлению подготовки 27.03.04 — Управление в технических системах

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2015

УДК 681.51(078)

ББК 32.965я73

С77

Рецензенты: кафедра физики Уральского государственного горного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. *И. Г. Коршунов*); канд. физ.-мат. наук *В. Н. Сафонов* (ООО «КомпьютерЭнергоСервис»)

Научный редактор — канд. техн. наук, доц. *Ю. Н. Чесноков*

**Старостин, А. А.**

С77 Технические средства автоматизации и управления : учеб. пособие / А. А. Старостин, А. В. Лаптева. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 168 с.

ISBN 978-5-7996-1498-0

В пособии рассмотрены технические средства автоматизации: датчики, исполнительные механизмы, вычислительные сети, структуры систем автоматического управления, регулирующие клапаны и др. Приведены примеры конкретных устройств.

Библиогр.: 26 назв. Табл. 21. Рис. 72.

УДК 681.51(078)

ББК 32.965я73

*На обложке использованы фотографии с сайтов: <http://solaris-club.net/gallery/showimage.php?i=107&c=6>, <http://www.agroacadem.ru/?p=4853>, [http://rus-robot.com/articles/promyshlennyye\\_roboty\\_v\\_piwevoj\\_promyshlennosti/](http://rus-robot.com/articles/promyshlennyye_roboty_v_piwevoj_promyshlennosti/)*

ISBN 978-5-7996-1498-0

© Уральский федеральный университет, 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

**Т**ехнические средства определяют реально достижимые характеристики систем автоматизации и управления. Повышение требований к функциональным возможностям систем управления стимулирует разработку и производство новых поколений датчиков, контроллеров, исполнительных устройств. Современные тенденции в развитии технической базы проявляются в повсеместном внедрении «интеллектуальных» устройств автоматики на основе интегральных микропроцессорных устройств. Например, повышение качественных характеристик датчиков в основном определяется возможностями встроенных микропроцессоров и искусством их программирования. Объединение микропроцессорных устройств в локальные сети способствует появлению принципиально новых систем с распределенным управлением, обеспечивающих возможность приспособления к требованиям конкретного производства. Использование периферийных устройств с развитыми функциями в системах супервизорного контроля, сбора данных и управления привело к появлению «роботизированных» технических систем. В настоящее время распространены интеграция отдельных функций сбора, промежуточная обработка и преобразование информации в единых устройствах, построенных на базе цифровых сигнальных процессоров, программируемых логических интегральных схем, многопроцессорных модулей и модулей удаленного ввода-вывода сигналов. В результате разработки новых типов различных процессорных плат, одноплатных компьютеров обеспечивается полное соответствие открытой архитектуре РС-совместимого компьютера. Развиваются быстродействующие средства сетевого сбора и обработки данных на основе последовательных протоколов передачи кодированных сигналов RS-482/485, CAN, AS и др. Совершенствование систем автоматического управления неразрывно связано с повышением надежности их функционирования, надежности входящих в них технических устройств. Становятся обязательными функции диагностики и протоколирования состояния системы управления, резервирования каналов передачи данных, распределения функций обработки информации между устройствами.

В настоящем учебном пособии рассмотрены особенности проектирования и применения типовых технических средств систем управления.

Достаточно подробно рассмотрены датчики, исполнительные устройства и программируемые логические контроллеры, а также способы их соединения. Большое внимание уделено стандартам промышленных сетей. Наряду с рассмотрением традиционных вопросов авторы пытались привести технические данные современных технических устройств, которые выпускаются фирмами Siemens, Honeywell и др. Приведены и отечественные аналоги, активно продвигаемые на российском рынке средств автоматизации такими компаниями, как «Прософт», «Ракурс», PLC-Systems и др. При подготовке работы использовались учебники, справочники, монографии, статьи журналов, а также материалы информационных и коммерческих сайтов интернета. Рекомендуемая литература и перечень сайтов по вопросам промышленной автоматизации приведены в конце рукописи. Эти материалы могут быть полезны при выполнении курсовых работ и в дипломном проектировании.

# 1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

---

**С**истемный подход отличается от традиционного предположением, что целое обладает такими качествами, каких нет у его частей. Данная связь между целым и его частями дает определение системы — это *совокупность связанных между собой частей*. Целью объединения элементов в систему и является получение таких свойств и способностей в выполнении требуемых функций, каких нет у каждого отдельно взятого элемента:

- есть **электромотор** (простое вращение);
- есть **программируемый контроллер** (обработка информации).

Их соединение — **программируемый электропривод** (частотный привод).

Системный подход к проектированию предусматривает учет системных связей между отдельными частями системы, включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей, определение атрибутов, анализ влияния внешней среды. Системные связи накладывают ограничения на качественные и количественные характеристики компонентов системы.

Задача инженера при проектировании — разработать при некоторых ограничениях, накладываемых на способ решения, систему, обеспечивающую оптимальное выполнение поставленной задачи при некоторых ограничениях, накладываемых на результат решения.

При проектировании существуют ограничения:

- по знаниям;
- по срокам;
- по оборудованию;
- по вычислительной технике;
- по материальным затратам;
- по надежности;
- технологические;
- административные и т. д.

Осознание и конкретизация списка ограничений позволяет наметить рациональный путь проектирования, избежать неоправданных затрат, обосновать выбор необходимых средств реализации задач проекта. Поэтому необходимой частью проекта является раздел анализа специфики объекта проектирования. Для производственных систем управления необходим анализ специфики и вытекающих ограничений для технологического объекта управления (ТОУ). В частности, в курсовых и дипломных проектах необходимо выполнить соответствующий анализ ТОУ с конкретизацией списка ограничений для выбора технических средств управления.

Этапы процесса инженерного проектирования:

- 1) определение цели и постановка задачи;
- 2) определение ограничений, выбор пути решения, разработка плана;
- 3) формирование способа решения;
- 4) анализ способа решения;
- 5) конкретизация решений.

На этапах формирования, анализа и конкретизации решений возникает необходимость выбора соответствующих технических средств для создания проектируемой системы автоматизации и управления (САУ).

Технические средства автоматизации и управления (ТСАУ) используются в САУ для решения следующих задач:

- сбор и преобразование информации о состоянии процесса;
- передача информации по каналам связи;
- преобразование, обработка и хранение информации;
- формирование команд управления;
- использование и предоставление информации для воздействия на процесс (использование энергии, механики, средств физических воздействий для влияния на процесс);
- предоставление информации оператору.

Перечислим классы основных технических средств, обеспечивающие решение сформулированных задач:

- средства на входе САУ — датчики;
- средства на выходе САУ — выходные преобразователи, исполнительные устройства;
- внутрисистемные устройства САУ — блоки регулирования, наблюдатели (они вычисляют дополнительную информацию или формируют управляющие воздействия);
- вспомогательные устройства — технико-документирующие, оборудование визуализации и оповещения.

Конкретизация выбора технических средств неразрывно связана с задачей оптимизации стоимостных и технических характеристик системы.

Задачи оптимизации для выбора конкретных ТСАУ:

- по стоимости;

- по качеству;
- по надежности.

### *Этапы проектирования ТСАУ*

1. Техническое задание (составляет проектировщик, а не заказчик).
2. Этапы выполнения:
  - 2.1. проектирование структурно-алгоритмической части;
  - 2.2. разработка технических требований к техническим средствам;
  - 2.3. проектирование технического обеспечения САУ;
  - 2.4. разработка планов размещения и соединения компонентов САУ;
  - 2.5. оформление технической и рабочей документации.
3. Защита проекта на техническом совете заказчика.

При проектировании сложной задачи необходимо разделить ее на простые подзадачи, решение которых можно найти на уровне типовых структур.

При проектировании структурно-алгоритмической части разрабатывают общий алгоритм функционирования системы, определяют состав и структуру информационных потоков.

Как известно, основная концепция проектирования систем автоматического управления техническими и технологическими объектами состоит в следующем. Заданы математическая модель объекта управления и критерий оптимального функционирования системы управления этим объектом со всеми ограничениями; требуется определить алгоритм функционирования управляющего устройства и осуществить его техническую реализацию так, чтобы удовлетворялись все поставленные требования.

Для систем управления сложными технологическими объектами требуется определить еще и информационную структуру системы, т. е. число и местоположение дополнительных каналов связи объекта с управляющим устройством, поскольку подобные системы обычно строятся как многоконтурные и с компенсацией возмущений. Естественно, выбор информационной структуры системы влияет и на математическую модель объекта. Существует ряд ограничений на возможность получения достаточно хорошей модели объекта управления перед выполнением технического проекта системы управления. Эти ограничения обусловлены как организационными, так и принципиальными причинами.

Одним из важнейших ограничений организационного порядка следует считать существующую практику ввода в действие системы управления одновременно с вводом в действие основного технологического оборудования. Это требует выдачи проектной документации на изготовление системы управления практически одновременно с проектом на технологическое оборудование. К началу проектирования системы управления реальный объект еще отсутствует и, следовательно, отсутствует возможность получения его математической модели экспериментальным путем. Получение моделей расчетным путем сопряжено с вводом большого числа упрощающих предположений, допустимость которых невозможно проверить из-за отсутствия эталона для сравнения.



Принципиальные ограничения на точность моделей объектов управления, получаемых перед стадией проектирования, связаны с системным характером задачи создания математической модели объекта и возникающими вследствие этого парадоксами системного мышления типа парадоксов иерархичности и целостности. Речь идет о выборе структуры модели и критерия ее приближения к реальному объекту.

Этот выбор не только определяется свойствами объекта, но зависит также и от выбора критерия оптимального функционирования системы управления в целом, а следовательно, и от алгоритма функционирования ее управляющей части. Возникает системный парадокс: для получения модели объекта необходимо знать алгоритм функционирования управляющего устройства, для отыскания которого, собственно, и нужна модель объекта.

Неучёт этого парадокса может привести к тому, что спроектированная по модели объекта оптимальная система управления после реализации ее на реальном объекте может оказаться не только неоптимальной, но даже неустойчивой. В этом отношении, как показывает анализ, особенно опасными могут оказаться модели объектов, построенные по критериям минимума среднеквадратического или интегрального квадратического приближения, т. е. по критериям, получившим преимущественное применение.

Выход из этого парадокса, как и из всякого парадокса системного мышления, состоит в использовании метода последовательных приближений (итераций), который позволяет, основываясь на первоначальной заведомо неполной информации о модели объекта, постепенно пополнять ее одновременно с оптимизацией алгоритма управления. Организация такой итерационной процедуры «идентификации—оптимизации» должна включать и стадию ввода системы управления в действие.

Необходимо разумное перераспределение задач, решаемых при разработке систем управления технологическими процессами, между отдельными стадиями.

1. На стадии формулировки технического задания, технического и рабочего проектирования намечаются возможные варианты информационных структур системы управления и определяется информационное и техническое обеспечение, достаточное для реализации каждого варианта. Здесь допускается формулировка алгоритмов управления в общем виде; численные значения параметров настройки могут оцениваться с достаточно большой степенью приближения. В проект, помимо управляющих алгоритмов и реализующих эти алгоритмы технических средств, должны быть заложены как неотъемлемая часть проекта средства «идентификации—оптимизации» на стадии ввода системы в действие, а также при последующей эксплуатации объекта в целях совершенствования системы.

2. На стадии ввода (внедрения) системы в действие с помощью технических средств и программ, имеющих в составе системы, осуществляется оптимизация принятых вариантов решений и выбор из них наилучшего.

3. На стадии анализа функционирования системы проводится всестороннее изучение системы с целью:

а) конкретизировать методы настройки применительно к данному объекту и выдачи рекомендаций эксплуатационному персоналу по ее реализации;

б) выявить пути возможного совершенствования системы.

Сформулированная концепция проектирования в полном объеме может быть использована в системах управления, построенных на базе программируемых контроллеров, поскольку в таких системах имеется возможность безболезненного и практически любого изменения алгоритмов и структуры управления непосредственно в процессе пуска системы на действующем объекте.

Результатом проектирования технического обеспечения являются разработки систем локальной автоматики, блок-схем и состава измерительно-управляющего вычислительного комплекса с учетом технических требований, определяемых спецификой решаемой задачи.

Различают следующие классы технических требований:

а) основные — производительность, надёжность, устойчивость к условиям окружающей среды, помехоустойчивость, использование унифицированных блоков;

б) вспомогательные — совместимость отдельных технических средств по элементной и конструктивной базе;

в) экономические — достижение минимальных затрат по капитальным вложениям и эксплуатации по всему оборудованию. Следует учитывать во всех предыдущих пунктах.

Например, технические вычислительные средства оцениваются по качеству выполнения следующих функций:

- обработка поступающей информации;
- вывод требуемой информации для персонала;
- передача данных на верхний уровень;
- создание организационных систем для контроля персонала;
- фиксация входных и выходных параметров, управляющих воздействий.

Кроме того, для вычислительных средств, применяемых в системе, важно выбрать режим работы:

- реального времени (отклик на внешний запрос выполняется за минимальный промежуток времени, определяемый быстродействием управляемого процесса);
- по циклам управления, или координационный (управление содержит группы команд, которые повторяются циклически, например станки с программным управлением).

Системный анализ множества проектов и их последующей реализации позволил выявить общую важную закономерность между обобщенными за-

тратами и обобщенной эффективностью проекта как на этапе проектирования, так и последующей «жизни» системы. Закономерность выражается в волнообразной зависимости эффективности от затрат и отражает их нелинейную связь. Закономерность следует учитывать при планировании затрат на «инновационные» решения.

Обобщенная зависимость эффективности процесса инженерного проектирования и реализации проекта от затрат представлена на графике (рис. 1.1).

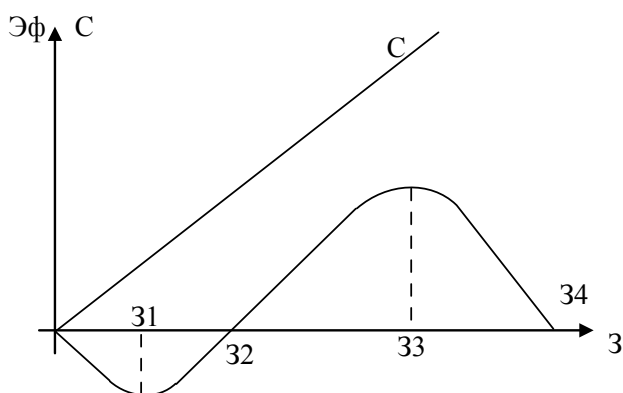


Рис. 1.1. Зависимость эффективности от затрат:

Эф — эффект; С — стоимость; З — затраты

Из анализа графика можно заметить, что эффективность проекта может быть низкой как при слишком малых затратах, так и при слишком больших.

31 — слишком мало затрат, отрицательная эффективность;

32 — нужно увеличивать затраты, нулевая эффективность;

33 — наилучшее сочетание; при таких затратах мы добьемся максимального уровня эффективности;

34 — слишком много затрат ведут к пустому растрачиванию средств, эффективность падает.

Системный подход, опыт и знания проектировщика помогают приблизиться к уровню наибольшей эффективности путем учета наибольшего числа важных связей в проектируемой системе и обусловленных ими ограничений. При оценке эффективности можно использовать методы аналогии, экспертных оценок, прямых расчетов, математического моделирования и другие методы. С помощью принципа эффективности можно сформулировать основной метод проектирования систем: единая система разделяется на части по функциональному признаку, устанавливаются возможные варианты реализации этих частей, связей между ними, и на заданном множестве вариантов выбирается структура системы, отвечающая требовани-

ям максимума ожидаемой эффективности. По отношению к задаче выбора технических средств систем автоматизации и управления важно руководствоваться принципами соразмерности и достаточности этих средств для выполнения поставленной задачи с учетом выявленных ограничений по условиям применения и допустимым затратам.

## 2. СТРУКТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

### 2.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ЦЕЛИ И ФУНКЦИИ САУ

**У**правление — выбор совокупности действий на основании информации о состоянии объекта, направленных на поддержание или улучшение функционирования объекта в соответствии с целью функционирования.

САУ предназначены для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления (ТОУ).

Цель функционирования САУ — оптимизировать технологический процесс по набору критериев.

Выделяют три основных класса функций САУ.

Управляющие функции:

- регулирование технологических переменных по отклонению (осуществляют системы с обратной связью);
- логическое управление группой оборудования;
- оптимальное управление (выполняется в целях достижения экстремума целевой функции, заданной на параметрах процессов объекта управления);
- адаптивное управление (изменяются параметры САУ при изменении параметров ТОУ).

Информационные функции:

- сбор, обработка и предоставление информации;
- централизованный контроль и измерение технологических параметров;
- косвенное измерение (вычисление) параметров процесса (переменных состояния и т. п.);
- формирование и выдача данных оперативному персоналу;
- подготовка и передача информации в смежные системы управления.

Вспомогательные функции:

- обслуживание и обеспечение контроля за техническими и программными средствами САУ.

## 2.2. КЛАССЫ САУ

САУ подразделяются на следующие классы:

- локальные системы управления;
- централизованные системы управления;
- автоматизированные системы управления техническими объектами и процессами (АСУ ТП).

Простейшая структура (рис. 2.1), которая является составной частью всех сложных систем, — автоматический локальный регулятор с отрицательной обратной связью (например, регулятор скорости вращения турбины).

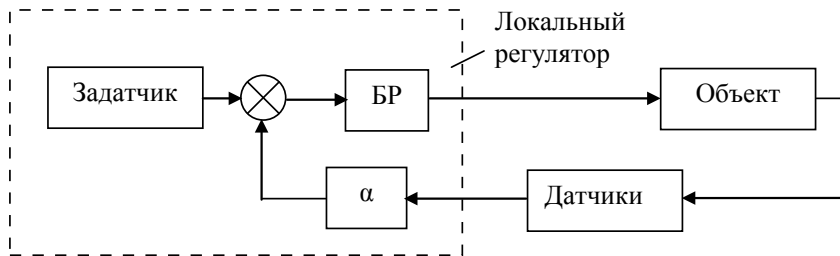


Рис. 2.1. Схема локального регулятора и объекта:  
 $\alpha$  — отрицательный коэффициент обратной связи;  
 БР — блок регулирования или локальный регулятор

Выходная информация об объекте, преобразованная датчиком, поступает на элемент сравнения. Разница сигналов от задатчика и с выхода датчика формирует сигнал ошибки управления, по которому блок регулирования формирует сигнал управления на объект.

Цель управления: с минимальной ошибкой и максимальной скоростью регулировать работу объекта для увеличения эффективности выполнения заданной функции. Цель достигается при помощи локального регулятора. Зачастую в единой конструкции локального регулятора интегрируются средства выполнения всех функций приема, передачи и преобразования сигналов для цели управления. Например, регулятор Уатта содержит центробежный датчик, механический преобразователь обратной связи и исполнительный привод в общем конструктивном исполнении, что в силу исключительной надежности обеспечивает до сих пор применение этой первой конструкции регулятора в качестве «последнего рубежа» в системах противоаварийной автоматики.

### Локальная САУ (рис. 2.2)

Структурная схема локальной САУ представлена на рис. 2.2. Элементы, обведенные рамкой на рисунке, — классическая система с локальным регулятором. Пунктирными стрелками показан путь, который позволяет ЛПР через устройства связи (УС) и ручного управления (РУ) воздействовать на исполнительное устройство (ИУ) непосредственно. Ручное управление применяется в случае необходимости:

- обрабатывать аварийные ситуации;
- не допускать больших изменений в контролируемом объекте.

При этом ручное управление должно иметь высокий коэффициент надежности.

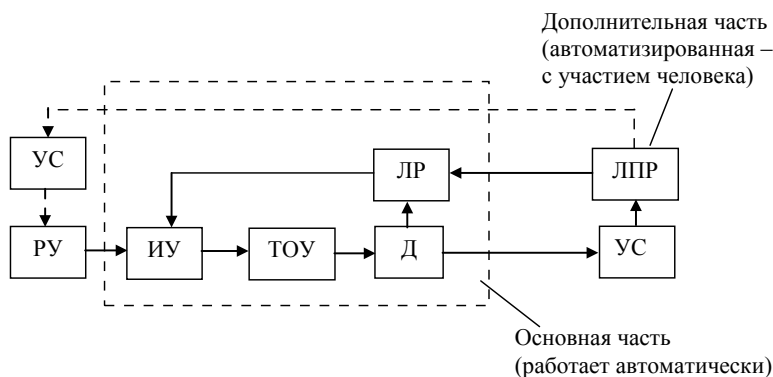


Рис. 2.2. Структурная схема локальной САУ:

ЛР — локальный регулятор, обычно имеет несколько входов (датчики и нормировка датчиков, передача данных с компьютера, корректировка задатчика); ЛПР — лицо, принимающее решение (меняет уставки задатчика локального регулятора, осуществляет ручное управление); РУ — ручное управление; ИУ — исполнительное устройство; Д — датчик; УС — устройство сопряжения или связи (Ethernet, интерфейс RS-485 и т. д.); ТОУ — технологический объект управления

### Централизованная САУ

Централизованная САУ может быть одноканальной (рис. 2.3) и многоканальной (рис. 2.4). Овалами на рисунках обозначены многожильные каналы связи.

#### Централизованная одноканальная система

Система устроена таким образом, что все решения принимает единый центральный управляющий орган, который соединён одним каналом связи с датчиками и с исполнительными устройствами. Такая структура сложилась исторически, и её идеология во многом повторяет ручные системы с дистанционным управлением. По мере усложнения объекта управления и связанных с ним решаемых задач увеличивается поток информации по каналу связи. Начиная с некоторого уровня сложности системы, возможности

одного канала связи становятся недостаточными, что обуславливает переход к многоканальным системам.

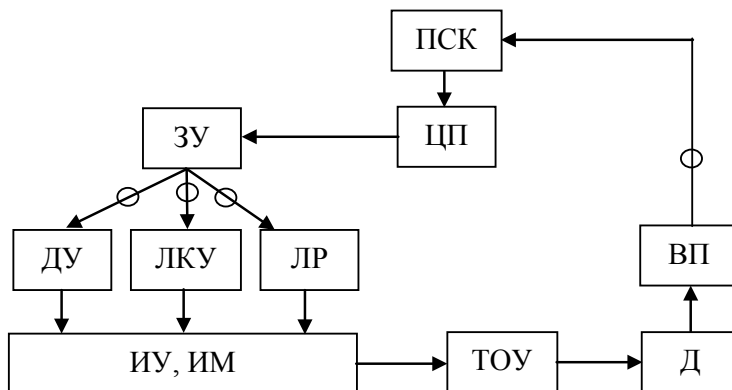


Рис. 2.3. Функциональная схема одноканальной системы:

ЗУ — задающее устройство; ПСК — приборы сигнализации, контроля табло; ЛКУ — логико-командное управление; ДУ — дистанционное управление; ИУ — исполнительные устройства; ИМ — исполнительные механизмы; ВП — вторичный преобразователь; ЦП — центральный пульт

### Централизованная многоканальная система

В многоканальной САУ центр осуществляет непосредственное управление обратными связями многочисленных технологических цепочек, влияющих на функционирование ТОУ. Распределитель каналов выполняет разбиение информации на множество линий. Коммутатор каналов служит для «сворачивания» информации в одну линию.

Когда много каналов передачи информации, то, как следствие, и много физических связей. Однако имеются ограничения на количество связей, например проводных линий. Существуют технические ограничения на средства связи и экономические ограничения на количество каналов. Поэтому используют уплотнение каналов (во времени или по частоте), а именно — разворачивание и сворачивание с помощью устройств РК и КК.

В многоканальной САУ можно выделить два потока данных: от объекта и на объект. Центральный пульт (ЦП) — это центр всей системы. Предполагаем, что ЦП осуществляет непосредственное управление или вмешивается в работу обратных связей (ОС), которые влияют на объект. Возникает множество цепочек ОС (они все не показаны), которые реализуются через МРУ и МЛКУ. РК распределяет каждому ИУ свою информацию. Каждая подзадача использует часть ресурсов ЦП. Контроль работы исполнительных устройств осуществляется с помощью ветки контроля через УС. ЦП и ТОУ территориально разнесены.



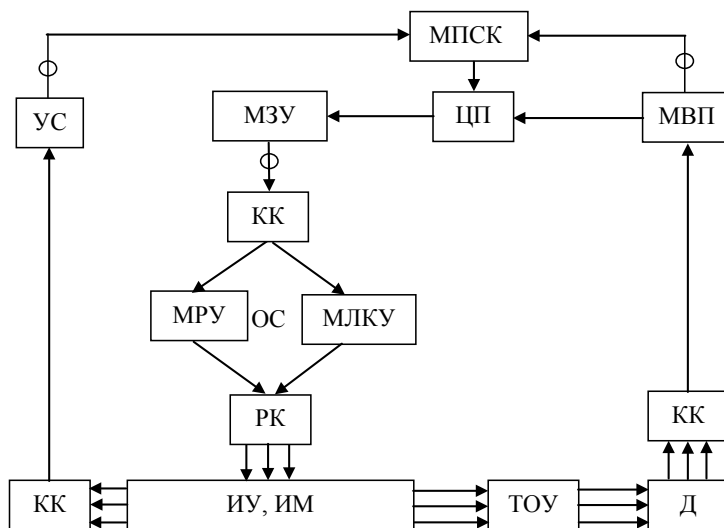


Рис. 2.4. Функциональная схема многоканальной САУ:

МЗУ — многоканальное задающее устройство; ЦП — центральный процессор (пульт); РК — распределитель каналов; КК — коммутатор каналов;

МПСК — многоканальные приборы сигнализации и контроля;

МРУ — многоканальное регулирующее устройство; МЛКУ — многоканальное логико-командное устройство; Д — датчики; ИУ — исполнительные устройства;

ИМ — исполнительные механизмы; УС — устройство связи;

МВП — многоканальные вторичные приборы; ТОУ — технологический объект управления

## 2.3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

### Цели и функции АСУ ТП

Определение конкретных целей функционирования системы является первоочередной задачей проектирования АСУ ТП. Можно сформулировать следующие цели:

- экономия топлива, сырья, материалов;
- обеспечение безопасности работы ТОУ;
- повышение качества выходного продукта;
- снижение затрат живого труда;
- достижение оптимальной загрузки оборудования;
- оптимизация режимов работы ТОУ.

Функции АСУ ТП — это совокупность действий системы, направленных на достижение частной цели управления. Под совокупностью действий системы подразумевается последовательность операций и процедур, выполняемых частями системы.

Функции АСУ ТП делят на следующие классы:

- управляющие.
- информационные.
- вспомогательные.

Результатом управляющей функции является выработка и реализация управляющих воздействий. Выработка управляющих воздействий — это выбор на основе имеющейся информации наиболее рациональных из них. Реализация состоит из действий по осуществлению выработанных управляющих воздействий. Различие в АСУ ТП понятий «выработка» и «реализация» обусловлено разделением субъектов, их выполняющих (электронная вычислительная машина или оператор).

Основные управляющие АСУ ТП функции:

- регулирование отдельных технологических параметров;
- одноктактное логическое управление технологическими операциями или агрегатами;
- программное логическое управление группой оборудования;
- оптимальное управление установившимися или переходными технологическими режимами или отдельными стадиями ТП;
- адаптивное управление объектом в целом.

Содержание информационной функции АСУ ТП состоит в сборе, обработке и предоставлении информации о состоянии АТК оперативному персоналу или в передаче этой информации для последующей обработки. К основным информационным функциям относятся следующие:

- централизованный контроль и измерение технологических параметров;
- косвенное измерение (вычисление) параметров процесса (техно-экономических показателей, внутренних переменных и т. д.);
- формирование и выдача данных оперативному персоналу;
- подготовка и передача информации в смежные системы управления;
- обобщенная оценка и прогноз состояния АТК и его оборудования.

Информационные и управляющие функции являются основными, они направлены на конкретного потребителя (ТОУ, оперативный персонал, смежные АСУ и т. п.).

Вспомогательные функции АСУ ТП обеспечивают решение внутрисистемных задач и не имеют потребителя вне системы. Они обеспечивают функционирование комплекса технических средств (КТС) АСУ ТП.

### **Классификация АСУ ТП**

Существует два класса АСУ ТП:

- централизованные;
- распределенные.

### **Централизованные АСУ ТП**

Централизованные АСУ ТП имеют одну электронную вычислительную машину (ЭВМ), устанавливаемую в машинном зале центрального диспетчерского поста.

По режиму реализации функций АСУ ТП имеют нижеследующую классификацию.

1. АСУ ТП с автоматизированным выполнением управляющих функций

В таких АСУ ТП оператор-технолог вырабатывает (или принимает) решение и (или) реализует управление. Имеются следующие разновидности АСУ ТП этого класса.

1.1. АСУ ТП с ручным управлением, в которых вычислительный комплекс (ВК) выполняет информационные функции. Человек выбирает и реализует управляющие воздействия.

1.2. АСУ ТП с ВК в режиме «советчика». Здесь ВК анализирует входную информацию, ищет оптимальное решение, выдает рекомендации (советы) по управлению на устройства наглядного отображения (УНО). Оператор-технолог выбирает и реализует управление согласно советам и своему опыту. Структурная схема такой АСУ ТП приведена на рис. 2.5, на котором введены следующие обозначения: АРМ ОТ — автоматизированное рабочее место оператора-технолога; САР — системы автоматического регулирования. Оператор-технолог с пульта управления задает САР уставки. Обратные связи на САР поступают с источников информации.

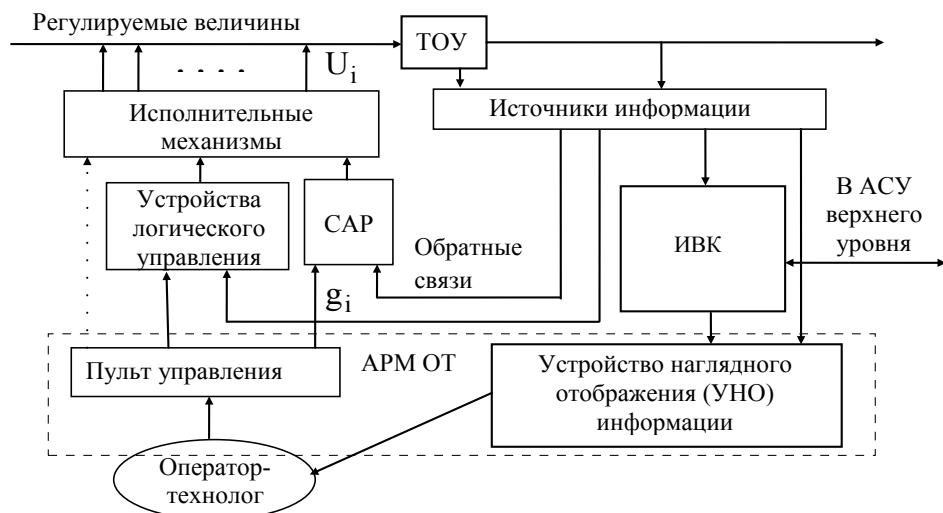


Рис. 2.5. Структура АСУ ТП советующего типа

На рис. 2.6 изображена структурная схема САР, где указаны сигналы, соответствующие рис. 2.5.



Рис. 2.6. Структурная схема элементарной САР

1.3. АСУ ТП с диалоговым режимом. В таких системах оперативный персонал в режиме диалога может корректировать постановку и условия задачи, решаемой ВК при выработке рекомендаций по управлению объектом.

## 2. АСУ ТП с автоматическим режимом выполнения управляющих функций

В таких АСУ ТП вычислительный комплекс вырабатывает и реализует управляющие воздействия в двух режимах, что определяет два подкласса АСУ ТП. За оператором остаются функции общего наблюдения за ходом процесса, внесения корректив в управление (при изменении параметров сырья, выпускаемой продукции и т. п.).

2.1. АСУ ТП с косвенным режимом управления (супервизорное управление). Основная задача супервизорного управления заключается в автоматическом поддержании ТП вблизи оптимальной рабочей точки путем оперативного воздействия на него. ВК задает уставки САР и изменяет циклы коммутации устройств логического управления. Это позволяет управлять большим числом контуров регулирования, в том числе взаимосвязанными контурами. Структурная схема супервизорной АСУ ТП представлена на рис. 2.7, на котором пунктирные связи отображают каналы управляющих воздействий, используемые в нештатных ситуациях (например, при выходе из строя ВК).

При выходе из строя ВК системы регулирования продолжают работать с уставками, которые были на моменты отказа ВК. В дальнейшем возможна частичная коррекция уставок вручную.

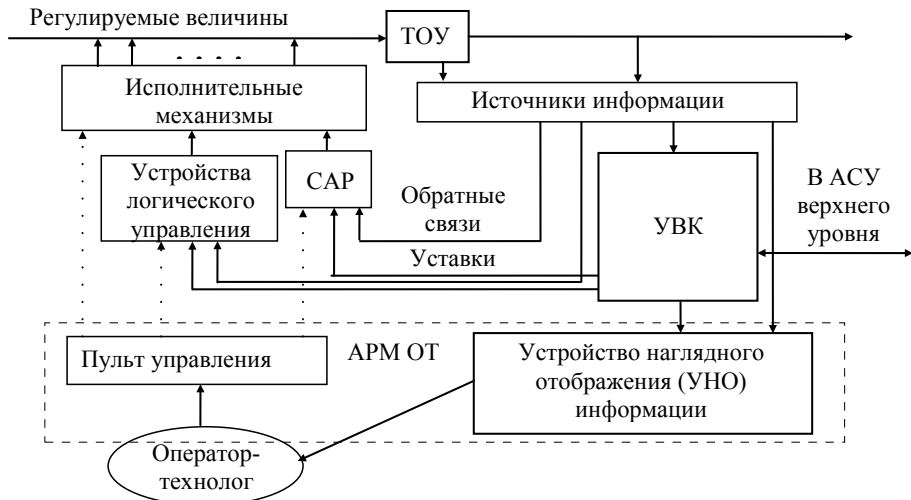


Рис. 2.7. Структура супервизорной АСУ ТП

2.2. АСУ ТП с непосредственным, или прямым, цифровым управлением (НЦУ, ПЦУ). В таких системах ВК формирует воздействия на исполнительные механизмы для каждого контура управления, выполняя все функции регулирующих блоков САР (сравнение сигналов уставки и выхода системы,

реализация стандартных законов регулирования). Структурная схема АСУ ТП типа ПЦУ приведена на рис. 2.8.

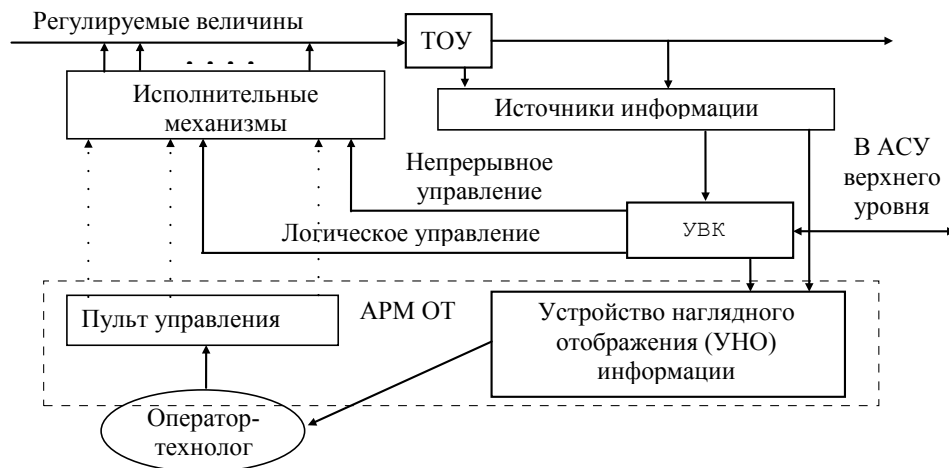


Рис. 2.8. Структура АСУ ТП непосредственного, или прямого, цифрового управления

### Распределённые АСУ ТП

В распределенных АСУ ТП применяется иерархия вычислительных средств. Центральная управляющая вычислительная машина (УВМ) соединена вычислительной сетью через устройства связи (УС) с локальными контроллерами. Задача центральной УВМ — координация работы локальных контроллеров заданием уставок. Локальные контроллеры реализуют многоканальное регулирование соответствующими частями ТОУ. Такое построение системы повышает ее надежность, поскольку при выходе из строя центральной УВМ локальные системы продолжают работать на основе выданных им данных в предыдущие моменты времени.

## 2.4. СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АСУ ТП

Структуры распределенных АСУ ТП определяются топологией локальных вычислительных сетей, которые объединяют все вычислительные средства системы. Применяются три структуры распределенных систем (рис. 2.9):

- радиальная (звезда);
- кольцевая (кольцо);
- магистральная (шина).

*Радиальная* распределенная схема имеет центральное вычислительное и коммутирующее устройство и подсистемы, связанные с ним своей локальной связью (рис. 2.9, а). В радиальной системе имеется гораздо боль-

ший запас по быстродействию, так как все линии выделены отдельно и нет необходимости в адресной идентификации.

Радиальная схема характеризуется хорошей экономичностью, УС простые, дешевые, но унификация и эволюция затруднены (надо прокладывать новые линии связи), надёжность определяется надёжностью центрального устройства связи (ЦУС).

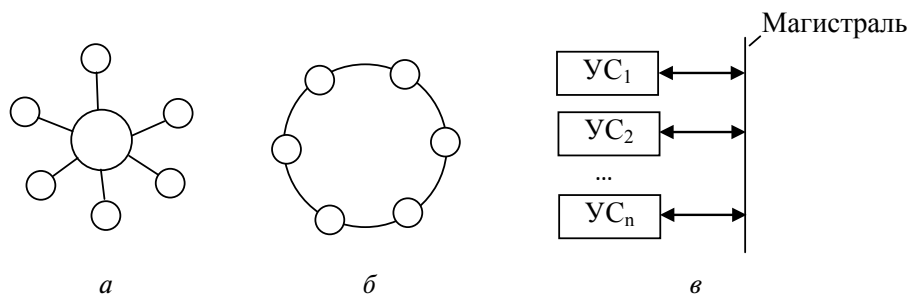


Рис. 2.9. Функциональные схемы распределенных АСУ ТП:

а — радиальная; б — кольцевая; в — магистральная

Преимущества радиальной системы:

- линия связи выделена для каждого направления, обеспечивает максимальную скорость обмена;

- подсистемы являются независимыми;
- устройства связи (сопряжения) получаются более простыми;
- выход из строя одной связи не затрагивает другие.

Недостатки радиальной системы:

- большое количество линий связи;
- дороговизна линий связи;
- узлы взаимодействуют между собой только через центральную систему, следовательно, если центральная система выйдет из строя, то локальные системы не смогут взаимодействовать между собой;

- высокие требования к физической организации центра.

**Кольцевая** распределенная схема (рис. 2.9, б) характеризуется кольцевым соединением своих компонент, т. е. каждая компонента соединяется с двумя соседними.

Преимущества кольцевой системы:

- уменьшаются затраты на прокладку кабелей;
- увеличивается дальность связи;
- передача информации по регламенту обеспечивает равный доступ к ресурсам;

- надёжность: единичный разрыв кольца не разрушает систему.

Недостатки кольцевой системы:

- аппаратура сопряжения сложнее (усложнение и удорожание);
- выход из строя УС ведет к разрыву кольца.

В *магистральной* распределенной АСУ ТП вблизи объектов прокладывается магистраль (кабель) и к ней параллельно присоединяются локальные системы (рис. 2.9, в). Устройство сопряжения (УС) может выполнять функцию регенерации сигнала.

Магистральная схема имеет большие экономические затраты, но перспективы связаны с унификацией и эволюцией (выход какого-либо устройства из строя не означает нарушения целостности магистрали в отличие от радиальной и кольцевой структуры).

Преимущества магистральной системы:

- в любом месте можно подключать устройство, не прерывая процесса;
- модули можно выпускать массовым тиражом;
- выход из строя какого-либо устройства не влияет на работу системы.

Недостатки магистральной системы:

- наращиваются требования к устройствам связи и сопряжения;
- ограниченное количество подключаемых устройств;
- магистральная линия требует сопрягающих устройств (адаптеров), которые определяют принадлежность пришедшего сообщения той или иной локальной системе.

Особенности магистральной структуры:

- выход какого-либо устройства из строя не означает нарушения целостности магистрали в отличие от радиальной и кольцевой систем;
- к магистральной системе можно присоединиться и производить изменения с минимальными помехами в работе системы.

Для того чтобы выполнить такие требования магистрали, строится специальная схема гальванической развязки, обеспечивающая надежность с помощью нижеследующих элементов:

- трансформаторная развязка;
- оптическая развязка;
- емкостная развязка.

Трансформаторное соединение обеспечивает гальваническую развязку, т. е. устраняет непосредственное соединение электрических сигнальных проводов.

Оптическая развязка выполняется оптопарами, состоящими из светодиода и фотодиода.

Емкостная развязка в виде низкочастотного фильтра — самая простейшая. Она обеспечивает защиту оборудования от возможного перенапряжения при емкости порядка 1 пФ. Для передачи сигналов через столь малую емкость используют радиочастоты более 1 МГц.

Затраты на оборудование на магистральной структуре выше, но и преимущества магистрали больше, а именно: оборудование выполняется в массовом порядке (следовательно, более низкая себестоимость).

При выборе топологии распределенной АСУ ТП необходимо руководствоваться следующими принципами:

- функциональность (сколько задач может решать система и какие это задачи);
- унификация и эволюция (возможность заменять отдельные звенья системы, функциональные блоки, наращивать систему наиболее экономичным способом);
- показатель надёжности и жизнеспособности (возможность системы функционировать без присутствия её разработчика и наладчика);
- экономические затраты (на начальную разработку, установку и последующую её эксплуатацию).



### 3. ТИПОВОЙ СОСТАВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ САУ

---

**Р**азличают три уровня в типовом составе технических средств, объединяемые информационными средствами в составе системы (рис. 3.1).

**I уровень — аппаратный** (выполняет функции, жестко заданные проектировщиком):

- датчики;
- модули регулирования;
- блоки задающих устройств;
- модули логико-командного управления;
- модули гальванической развязки;
- модули нормализации и фильтрации сигналов;
- модули представления данных;
- модули управляющих воздействий;
- буферная память;
- программируемые таймеры;
- функциональные преобразователи.

**II уровень — аппаратно-программный** (здесь сосредоточено решение интеллектуальных задач, гибкая алгоритмическая структура):

- блок программного логического управления;
- блок многоканального сбора и обработки данных;
- программируемые логические контроллеры ПЛК (PLC).

**III уровень — общесистемные средства:**

- адаптеры связи;
- блоки общей памяти;
- аварийные устройства (запись поведения системы в аварийных условиях);
- пульт оператора (следит за всей системой);
- цепи сигнализации и контроля.

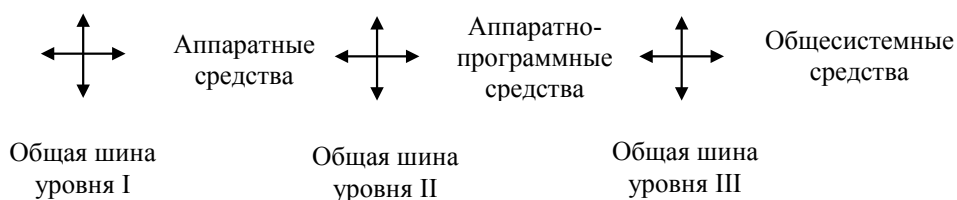


Рис. 3.1. Взаимодействие между уровнями ТСАУ

Существует также деление по информационному принципу:

- устройства получения информации о состоянии объекта или процесса (датчики, преобразователи);
- устройства преобразования первичной информации (нормирующие устройства, гальваноразвязка и кодирование) для передачи информации по каналам связи;
- устройства преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд и управляющих воздействий (вычислительная техника, алгоритмы);
- устройства преобразования информации и передачи команд управления (для передачи исполнительному устройству);
- устройства исполнения, усиления командной информации (приводы);
- исполнительные устройства и регулирующие органы (заслонки, тиристоры, преобразователи).

Проблема сопряжения устройств требует введения унификации ТСАУ — стандартизации приборов по определенным параметрам для подключения их друг к другу без дополнительных устройств. В частности, необходимо унифицировать параметры сигналов, которыми обмениваются приборы (пример в табл. 3.1). Стандарт для тока в диапазоне «4—20 мА» имеет следующие преимущества:

- легко заметить обрыв;
- с помощью добавочного тока 4 мА можно питать удаленные датчики или устройства; в результате по одной паре проводов проходит и сигнал, и питание.

Таблица 3.1

## Унификация сигналов

Параметры	Диапазон			
Ток (постоянный) $I$ , мА	0—5	4—20	0—20	-20—+20
Напряжение (постоянное) $U$ , В	0—10	от -10 до +10	0—20	0—50
Напряжение (переменное) $\sim U$ , В	0—1	0—2	0—5	0—10
Частота $f$ , Гц	0—10	0—100	0—1000	0—10000

## 4. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРИБОРОВ (ГСП)

---

**Г**осударственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) создана в целях обеспечения техническими средствами систем контроля, регулирования и управления технологическими процессами в различных отраслях народного хозяйства.

На ранних этапах создания средств автоматики в различных организациях и на предприятиях разрабатывалось множество различных приборов измерения и контроля со сходными техническими характеристиками, однако при этом не учитывалась возможность совместной работы приборов различных производителей. Это приводило к увеличению стоимости разработок сложных систем и тормозило широкое внедрение средств автоматизации. Поэтому в 1960 г. было принято решение о создании ГСП, а с 1961 г. начались работы по ее реализации.

В настоящее время ГСП представляет собой эксплуатационно, информационно, энергетически, метрологически и конструктивно организованную совокупность изделий, предназначенных для использования в качестве средств автоматических и автоматизированных систем контроля, измерения, регулирования технологических процессов, а также информационно-измерительных систем. ГСП стала технической базой для создания автоматических систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и производством (АСУП) в промышленности. Ее развитие и применение способствовали формализации процесса проектирования АСУ ТП и переходу к машинному проектированию.

В основу создания и совершенствования ГСП положены следующие системотехнические принципы: типизация и минимизация многообразия функций автоматического контроля, регулирования и управления; минимизация номенклатуры технических средств; блочно-модульное построение приборов и устройств; агрегатное построение систем управления на базе унифицированных приборов и устройств; совместимость приборов и устройств.

Заложенные в ГСП общие для всех изделий понятия совместимости можно сформулировать нижеследующим образом.

*Информационная совместимость* — совокупность стандартизированных характеристик, обеспечивающих согласованность сигналов связи по видам и номенклатуре, их информативным параметрам, уровням, пространственно-временным и логическим соотношениям и типу логики. Для всех изделий ГСП приняты унифицированные сигналы связи и единые интерфейсы, которые представляют собой совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих взаимодействие устройств в системе.

*Конструктивная совместимость* — совокупность свойств, обеспечивающих согласованность конструктивных параметров и механическое сопряжение технических средств, а также выполнение эргономических норм и эстетических требований при совместном использовании.

*Эксплуатационная совместимость* — совокупность свойств, обеспечивающих работоспособность и надежность функционирования технических средств при совместном использовании в производственных условиях, а также удобство обслуживания, настройки и ремонта.

*Метрологическая совместимость* — совокупность выбранных метрологических характеристик и свойств средств измерений, обеспечивающих сопоставимость результатов измерений и возможность расчета погрешности результатов измерений при работе технических средств в составе систем.

В ГСП входят следующие устройства:

- получения информации об объекте (датчики, преобразователи);
- преобразования информации (нормирующие устройства, гальвано-развязка и кодирование) для передачи информации по каналам связи;
- преобразования, обработки, хранения и выработки команд и управляющих воздействий (вычислительная техника, алгоритмы);
- преобразования информации управления для передачи по каналам связи;
- преобразования информации управления (на объекте для устройства);
- исполнительные и регулирующие органы.

При проектировании новых систем автоматизации непременно следует выбирать приборы, занесенные в каталоги ГСП. Рассмотрим некоторые из них.

## 5. УСТРОЙСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОБЪЕКТЕ. ДАТЧИКИ

**П**ервичные информационные устройства — датчики — предназначены для сбора и преобразования информации без изменения ее содержания. Датчик состоит из двух частей (рис. 5.1):

- чувствительного элемента — непосредственно датчика, на выходе которого имеется естественный (неунифицированный) сигнал;
- измерительного преобразователя, который приводит выходную величину чувствительного элемента к стандартному виду (рис. 5.2).

Чаще всего эти части конструктивно исполняются в одном корпусе, в результате чего и получается «датчик» с унифицированным выходным сигналом. Но может быть и так, что они являются отдельно производимыми самостоятельными приборами.

Датчик — это элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства, преобразующий контролируемую величину в сигнал, удобный для измерения, хранения, обработки и передачи.

Другими словами, датчик — это устройство, преобразующее входное воздействие любой физической величины в сигнал, удобный для дальнейшего использования.

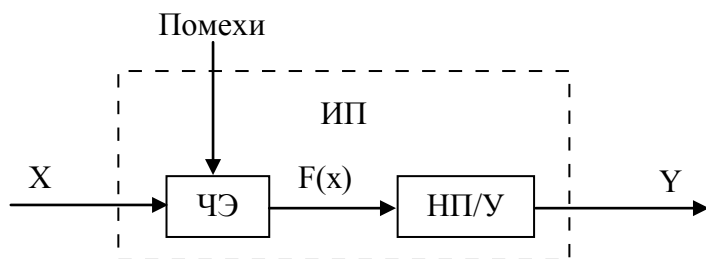


Рис. 5.1. Структура измерительного преобразователя — датчика:  
X — физическая величина; ЧЭ — чувствительный элемент; ИП — измерительный преобразователь; НП/У — нормирующий преобразователь/усилитель;  
F(x) — электрическая величина; Y — стандартизированный сигнал

*Входные* измеряемые и регулируемые величины, преобразуемые датчиками, соответствуют физическим параметрам ТОО. Например, распространены следующие технологические параметры:

- теплоэнергетические: температура, давление, перепад давления, уровень, расход;
- электроэнергетические: переменный и постоянный ток, постоянное и переменное напряжение, активная/реактивная мощность, мощность полная, коэффициент мощности, частота, индукция;
- механические величины: линейные, угловые (угловая скорость), деформация, усилие, крутящий момент, твердость, вибрация, масса, шум;
- химические: концентрация, химический состав, химические свойства;
- физические: влажность, плотность, вязкость, мутность, электропроводность, магнитная проницаемость.

*Выходная* величина обычно модулируется:

- по амплитуде;
- временному признаку (частота, фаза и т. д.);
- кодовому признаку;
- пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи).

*Основные характеристики измерительных преобразователей (датчиков)*

1. Диапазон изменения входной величины (диапазон по входу, род величины).
2. Диапазон изменения величины выходного сигнала (для сопряжения).
3. Статические характеристики (определяют точность). Показывает взаимную связь между входной и выходной величиной без учета динамических погрешностей (см. рис. 5.2). В общем случае эта характеристика нелинейная. Ее обычно линеаризуют в рабочей точке (прямые линии на рис. 5.2).

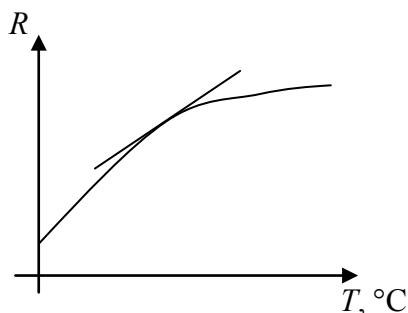


Рис. 5.2. Статическая характеристика датчика температуры

4. Динамические характеристики (максимальная частота, время установления выходного сигнала) показывают зависимость выходной величины от входной в неустановившемся режиме (рис. 5.3).

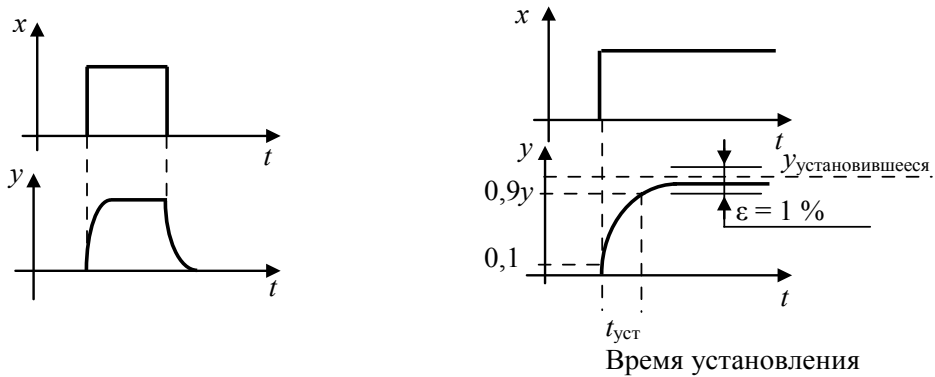


Рис. 5.3. Динамические характеристики датчиков

Если на вход датчика подать переменный сигнал различной частоты, то получим частотную характеристику датчика — выходную величину  $f_{\text{вых}}$ , представленную на рис. 5.4.

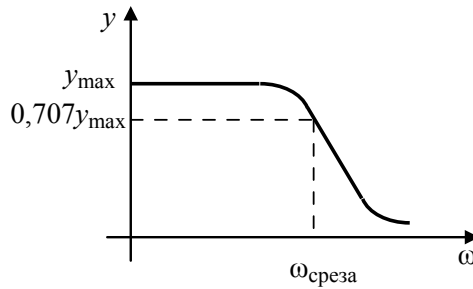


Рис. 5.4. Частотная характеристика датчика

Здесь  $\omega_{\text{среза}}$  — частота среза, на которой коэффициент передачи звена изменяется на 3 дБ или составляет 0,707 от начального значения. Частота  $\omega_{\text{среза}}$  соответствует постоянной времени  $\tau = 1/\omega_{\text{среза}}$ . Время установления  $t_{\text{уст}} \sim 3\tau$ .

5. Порог чувствительности (зона нечувствительности) — вводится для подавления шума и помех. Нечувствительность может быть односторонней или двусторонней (рис. 5.5).

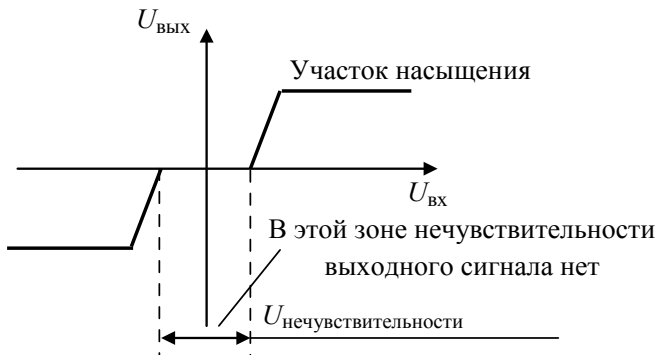


Рис. 5.5. Порог чувствительности/нечувствительности

6. Погрешности:

- основные  $S_{\text{осн}}$ ;
- дополнительные  $S_{\text{доп}}$  (возникают из-за дополнительных факторов: влажность, температура).

Учитываем полную погрешность с учетом дополнительных факторов:

$$S_{\text{полн}} = \sqrt{S_{\text{осн}}^2 + S_{\text{доп}}^2}.$$

Дополнительная погрешность оценивается в виде функции параметра  $p$ , от которого есть зависимость

$$S_{\text{доп}} = f(p_1, p_2, p_3).$$

Основные требования, предъявляемые к датчикам при их выборе в процессе проектирования:

- однозначная зависимость выходной величины от входной;
- стабильность характеристик во времени;
- высокая чувствительность;
- малые размеры и масса по сравнению с объектом;
- отсутствие обратного воздействия на контролируемый процесс и на контролируемый параметр;
- работа при различных условиях эксплуатации;
- унификация выходных сигналов с другими системными средствами;
- различные варианты монтажа.



## 6. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ

---

**И**спользуемые в системах автоматики датчики весьма разнообразны и могут быть классифицированы по различным признакам.

### 6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ВИДУ ВХОДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

#### **I. Механические датчики:**

- упругие (мембраны);
- дроссельные (измеряется перепад давления в узком месте);
- объемные;
- поплавковые;
- скоростные.

#### **II. Электромеханические датчики:**

– тензорезистивные (деформация объекта вызывает деформацию проволочного датчика). Длина датчика больше ширины для выделения составляющей деформации вдоль датчика. Вследствие деформации провод растягивается, его длина  $l$  увеличивается, диаметр  $d$  уменьшается, сопротивление провода  $R$  увеличивается — это проявление эффекта Пуассона (рис. 6.1, а):

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{4l}{\pi d^2},$$

где  $\rho$  — коэффициент удельного сопротивления;  $l$  — длина проводника;  $d$  — его диаметр;

- электростатические для измерения перемещения (рис. 6.1, б);
- электромагнитные — изменение положение сердечника изменяет сигнал на выходе (рис. 6.1, в);
- тахометрические (измеряют число оборотов).

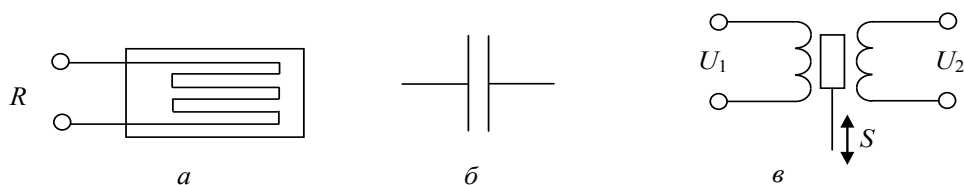


Рис. 6.1. Схемы электромеханических датчиков: *а* — тензорезистивные;  
*б* — электростатические; *в* — электромагнитные

### III. Электрические датчики:

- кондуктометрические (измеряют проводимость среды, чтобы «понять» измеряемый параметр);
- потенциометрические (между электродами задаётся напряжение);
- полярографические (действие основано на явлении поляризации на границе растворов для определения их состава).

### IV. Тепловые датчики:

- термоэлектрические (термопара — рис. 6.2, *а*).
- терморезистивные (в таких датчиках сопротивление зависит от температуры, применяются для низких, средних и высоких температур (рис. 6.2, *б*));
- термомеханические (в основе таких датчиков лежат биметаллические пластины, применяется металл с памятью формы, металл нагревают и деформируют определенным образом, обрабатывают, потом при нагреве до этой же температуры металл «вспоминает» свое состояние при этой температуре и принимает ту же форму);
- манометрические (такие датчики состоят из мембраны и сильфона, в котором присутствует жидкая или газообразная среда);
- термокондуктометрические (действие таких датчиков основано на зависимости проводимости среды от температуры).

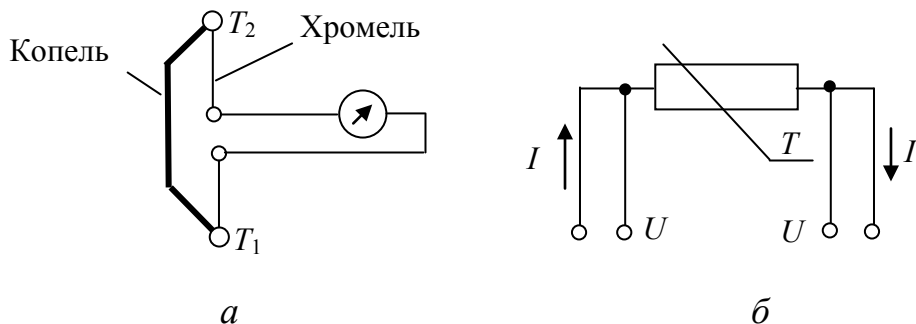


Рис. 6.2. Схемы тепловых датчиков: *а* — дифференциальная термопара;  
*б* — терморезистор

## V. Оптические датчики:

– фотокolorиметрические (поглощают кванты света, происходит избирательное пропускание, оценивается интенсивность определенного спектрального компонента) (рис. 6.3, *a*);

– рефрактометрические (отклонение показаний датчика происходит за счёт разницы коэффициентов преломления, угол отклонения зависит от среды  $n = f(k)$ , это позволяет узнать состав вещества и его структуру) (рис. 6.3, *б*);

– оптикоакустические (облучается газ в датчике, это приводит к появлению звука, измерение является неразрушающим и бесконтактным) (рис. 6.3, *в*).

– нефелометрические (принцип действия: определяется мутность среды путём измерения рассеяния света) (рис. 6.3, *г*).

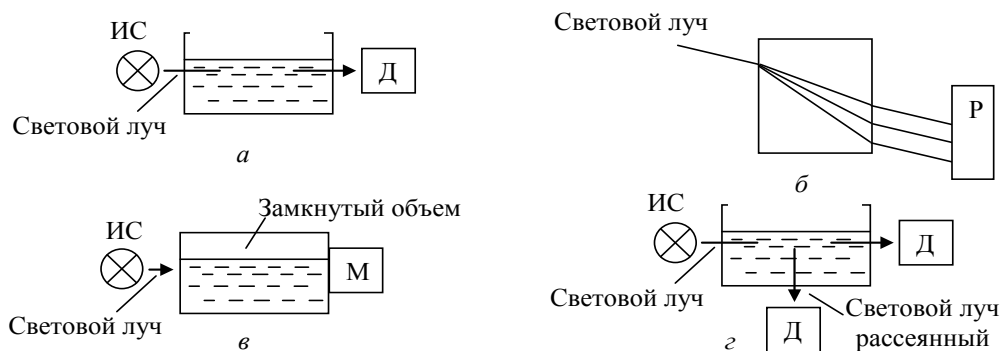


Рис. 6.3. Схемы оптических датчиков: *a* — фотокolorиметрические со спектральной зависимостью пропускания раствора; *б* — явление рефракции; *в* — устройство с оптикоакустической спектрометрией; *г* — нефелометрическое устройство;

ИС — источник света (лазерный); Д — датчик освещенности;

М — микрофон; Р — регистратор

## VI. Электронные датчики:

– индукционные (применяются для измерения вращения или тока);

– хроматографические (применяются для проведения измерений концентрации примесей в жидкостях);

– масс-спектрометрические (направленный поток ионизированных частиц пропускают через магнитное поле; чем больше масса частиц, тем менее отклоняется поток частиц. Спектр отклонения показывает распределение частиц по массе) (рис. 6.4);

– магнитные;

– радиоизотопные;

– диэлькометрические (измерение свойств веществ по их диэлектрической проницаемости).

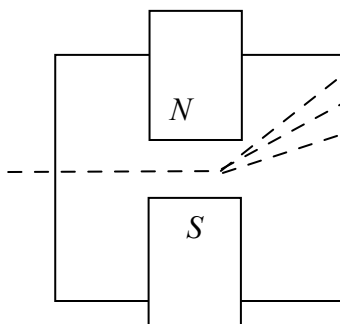


Рис. 6.4. Схема масс-спектрометра (поток частиц изображен пунктиром)

## 6.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ВИДУ ВЫХОДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Различают три класса датчиков:

- аналоговые датчики, т. е. датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал пропорционально изменению входной величины;
- цифровые датчики, генерирующие последовательность импульсов или двоичное слово;
- бинарные (двоичные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: «включено/выключено» (0 или 1). Они получили широкое распространение благодаря своей простоте.

подавляющее большинство датчиков имеют электрический выходной сигнал. Это обусловлено следующими достоинствами электрических измерений:

- электрические величины удобно передавать на расстояние, причем передача осуществляется с высокой скоростью;
- электрические величины универсальны в том смысле, что любые другие величины могут быть преобразованы в электрические, и наоборот;
- они точно преобразуются в цифровой код и позволяют достигнуть высокой точности, чувствительности и быстродействия средств измерений.

В настоящее время наиболее употребительными выходными сигналами датчиков являются стандартные сигналы тока и напряжения (ГОСТ 26011–80). Среди них наиболее удобным и популярным является токовый сигнал 4–20 мА. Он наилучшим образом решает проблемы, связанные с передачей сигналов от удаленных датчиков к вторичным измерительным приборам.

Сигналы первичных преобразователей, как правило, очень малы. В промышленных условиях сильные электромагнитные помехи могут создавать паразитные сигналы, в сотни и тысячи раз превышающие полезные. Сильные токовые сигналы уровня 4–20 мА работают на низкоомную нагрузку, в результате они меньше подвержены такому влиянию.

Стоит отметить, что при работе с токовым сигналом 4–20 мА легко обнаружить обрыв линии связи — ток будет равен нулю, т. е. будет выходить за возможные пределы. Обрыв в цепи с сигналом, например, 0–5 мА обнаружить нельзя, так как ток, равный нулю, считается допустимым.

### 6.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ПРИНЦИПУ ДЕЙСТВИЯ

По принципу действия датчики делятся на генераторные и параметрические.

**Генераторные датчики** осуществляют непосредственное преобразование входной величины в электрический сигнал. Такие датчики преобразуют энергию источника входной (измеряемой) величины сразу в электрический сигнал, т. е. они являются как бы генераторами электроэнергии. Дополнительные источники электроэнергии для работы таких датчиков принципиально не требуются (тем не менее дополнительная электроэнергия может потребоваться для усиления выходного сигнала датчика, его преобразования в другие виды сигналов и для других целей).

Генераторные датчики, в свою очередь, делятся на фотоэлектрические, термоэлектрические, пьезоэлектрические, индукционные и др.

**Фотоэлектрические датчики (фотодатчики)** — преобразуют выходной сигнал пропорционально внешней освещенности.

Различают *аналоговые* и *дискретные* фотоэлектрические датчики. У аналоговых датчиков выходной сигнал изменяется пропорционально внешней освещенности. Основная область применения — автоматизированные системы управления освещением. Датчики дискретного типа изменяют выходное состояние на противоположное при достижении заданного значения освещенности.

Фотоэлектрические датчики могут быть применены практически во всех отраслях промышленности. Датчики дискретного действия используются как своеобразные бесконтактные выключатели для подсчета, обнаружения, позиционирования и других задач на любой технологической линии.

Фотоэлектрический бесконтактный датчик регистрирует изменение светового потока в контролируемой области, связанное с изменением положения в пространстве каких-либо движущихся частей механизмов и машин, отсутствием или присутствием объектов. Благодаря большим расстояниям срабатывания оптические бесконтактные фотодатчики нашли широкое применение в промышленности и не только.

Фотоэлектрический бесконтактный датчик состоит из двух функциональных узлов — приемника и излучателя. Данные узлы могут быть выполнены как в одном корпусе, так и в различных корпусах.

По методу обнаружения объекта фотодатчики подразделяются на четыре группы:

1) **пересечение луча** — при этом методе передатчик и приемник разделены по разным корпусам, что позволяет устанавливать их напротив друг друга на рабочем расстоянии. Принцип работы основан на том, что передатчик постоянно посылает световой луч, который принимает приемник. Если световой сигнал датчика прекращается вследствие перекрытия сторонним объектом, приемник немедленно реагирует, меняя состояние выхода;

2) **отражение от рефлектора** — при этом методе приемник и передатчик датчика находятся в одном корпусе. Напротив датчика устанавливается рефлектор (отражатель). Датчики с рефлектором устроены так, что благодаря поляризационному фильтру они воспринимают отражение только от рефлектора. Это рефлекторы, которые работают по принципу двойного отражения. Выбор подходящего рефлектора определяется требуемым расстоянием и монтажными возможностями.

Посылаемый передатчиком световой сигнал, отражаясь от рефлектора, попадает в приемник датчика. Если световой сигнал прекращается, приемник немедленно реагирует, меняя состояние выхода;

3) **отражение от объекта** — при этом методе приемник и передатчик датчика находятся в одном корпусе. Во время рабочего состояния датчика все объекты, попадающие в его рабочую зону, становятся своеобразными рефлекторами. Как только световой луч, отразившись от объекта, попадает на приемник датчика, тот немедленно реагирует, меняя состояние выхода;

4) **фиксированное отражение от объекта** — принцип действия датчика такой же, как и у «отражение от объекта», но более чутко реагирующий на отклонение от настройки на объект. Например, возможно детектирование вздутой пробки на бутылке с кефиром, неполное наполнение вакуумной упаковки с продуктами и т. д.

По своему назначению фотодатчики делятся на две основные группы: датчики общего применения и специальные датчики. К специальным относятся типы датчиков, предназначенные для решения более узкого круга задач (например, обнаружение цветной метки на объекте, обнаружение контрастной границы, наличие этикетки на прозрачной упаковке и т. д.).

Задача датчика — обнаружить объект на расстоянии. Это расстояние варьируется в пределах от 0,3 мм до 50 м в зависимости от выбранного типа датчика и метода обнаружения.

### **Термоэлектрические преобразователи (термопары)**

Термопара представляет собой чувствительный элемент (рис. 6.5), измерительный преобразователь к которому монтируется отдельно. Термопара состоит из двух спаянных на одном из концов проводников, изготовленных из металлов, обладающих разными термоэлектрическими свойствами. Спаянный конец погружается в измеряемую среду, а свободные концы термопары подключаются к входу измерителей-регуляторов. Соединенные

между собой концы термопары, погружаемые в среду, температура которой измеряется, называют «рабочим спаем» термопары. Концы, которые находятся в окружающей среде, обычно присоединяют проводами к измерительной схеме и называют свободными концами («холодный спай»). Если температуры «рабочего» и «холодного» спаев различны, то термопара вырабатывает термоЭДС, которая и подается на прибор. ТермоЭДС прямо пропорциональна разности температур  $\Delta T = T_1 - T_0$  между спаем и концами термопары. Температуру этих концов необходимо поддерживать постоянной. При этом условии термоЭДС  $E_t$  будет зависеть только от температуры  $T_1$  рабочего конца:

$$U_{\text{вых}} = E_t = C (T_1 - T_0),$$

где  $C$  — коэффициент, зависящий от материала проводников термопары.

Создаваемая термопарами ЭДС сравнительно невелика: она не превышает 8 мВ на каждые 100 °С и обычно не превышает по абсолютной величине 70 мВ. Термопары позволяют измерять температуру в диапазоне от –200 до 2200 °С.

Наибольшее распространение для изготовления термоэлектрических преобразователей получили платина, платинородий, хромель, алюмель.

*Преимущества термопар:* простота изготовления, надёжность в эксплуатации, дешевизна, отсутствие источников питания, возможность измерений в большом диапазоне температур.

*Недостатки термопар:* меньшая, чем у терморезисторов, точность измерения, наличие значительной тепловой инерционности, необходимость введения поправки на температуру свободных концов, необходимость в применении специальных соединительных проводов.

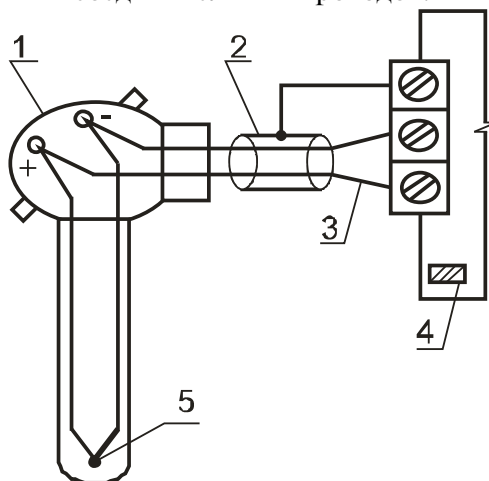


Рис. 6.5. Термопара: 1 — головка датчика; 2 — экран; 3 — термоэлектродный кабель; 4 — датчик температуры холодного спая; 5 — рабочий спай термопары

**Пьезоэлектрические датчики.** Действие таких датчиков основано на использовании пьезоэлектрического эффекта (пьезоэффекта), заключающегося в том, что при сжатии или растяжении некоторых кристаллов на их

гранях появляется электрический заряд, величина которого пропорциональна действующей силе.

Пьезоэффект обратим, т. е. приложенное электрическое напряжение вызывает деформацию пьезоэлектрического образца — сжатие или растяжение его соответственно знаку приложенного напряжения. Это явление, называемое обратным пьезоэффектом, используется для возбуждения и приема акустических колебаний звуковой и ультразвуковой частоты.

Пьезоэлектрические датчики используются для измерения сил, давления, вибрации и т. д.

**Индукционные датчики** преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в ЭДС индукции. Принцип действия датчиков основан на законе электромагнитной индукции. К этим датчикам относятся тахогенераторы постоянного и переменного тока, представляющие собой небольшие электромашинные генераторы, у которых выходное напряжение пропорционально угловой скорости вращения вала генератора. Тахогенераторы используются как датчики угловой скорости. Тахогенератор представляет собой электрическую машину, работающую в генераторном режиме. При этом вырабатываемая ЭДС пропорциональна скорости вращения и величине магнитного потока. Кроме того, с изменением скорости вращения изменяется частота ЭДС. Применяются для измерения угловых и линейных перемещений, деформаций, контроля размеров и т. д.

**Параметрические датчики** (датчики-модуляторы) входную величину преобразуют в изменение какого-либо электрического параметра ( $R$ ,  $L$  или  $C$ ) датчика. Передать на расстояние изменение перечисленных параметров датчика без сигнала напряжения или тока невозможно. Выявить изменение соответствующего параметра датчика можно только по его реакции на действие тока или напряжения, поскольку перечисленные параметры и характеризуют эту реакцию. Поэтому параметрические датчики требуют применения специальных измерительных цепей с питанием постоянным или переменным током.

Классификация параметрических датчиков по принципу действия:

- емкостные;
- индуктивные;
- омические.

**Емкостные датчики** — принцип действия основан на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров ( $S$ ), взаимного расположения его обкладок ( $h$ ) и диэлектрической проницаемости среды между ними ( $\epsilon$ ).

Для двухобкладочного плоского конденсатора электрическая емкость определяется выражением

$$C = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S / h,$$

где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  $S$  — активная площадь обкладок;  $h$  — расстояние между обкладками конденсатора.



Зависимости  $C(S)$  и  $C(h)$  используют для преобразования механических перемещений в изменение емкости.

На емкостные датчики подается переменное напряжение (обычно повышенной частоты — до десятков мегагерц). В качестве измерительных схем обычно применяют мостовые схемы и схемы с использованием резонансных контуров. В последнем случае, как правило, используют зависимость частоты колебаний генератора от емкости резонансного контура, т. е. датчик имеет частотный выход.

*Достоинства:* простота, высокая чувствительность, малая инерционность.

*Недостатки:* влияние внешних электрических полей, относительная сложность измерительных устройств.

Емкостные датчики применяют:

- для измерения угловых перемещений, очень малых линейных перемещений, вибраций, скорости движения и т. д.;
- для воспроизведения заданных функций (гармонических, пилообразных, прямоугольных и т. п.).

Емкостные преобразователи, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  которых изменяется за счет перемещения, деформации или изменения состава диэлектрика, применяют в качестве датчиков уровня непроводящих жидкостей, сыпучих и порошкообразных материалов, толщины слоя непроводящих материалов, а также контроля влажности и состава вещества.

**Индуктивные датчики** служат для бесконтактного получения информации о перемещениях рабочих органов машин, механизмов, роботов и т. п. и преобразования этой информации в электрический сигнал.

Принцип действия основан на изменении индуктивности обмотки на магнитопроводе в зависимости от положения отдельных элементов магнитопровода (якоря, сердечника и др.). В таких датчиках линейное или угловое перемещение (входная величина) преобразуется в изменение индуктивности ( $L$ ) датчика.

Индуктивный датчик распознает и соответственно реагирует на все токопроводящие предметы. Индуктивный датчик не требует механического воздействия, работает бесконтактно за счет изменения электромагнитного поля.

В простейшем случае индуктивный датчик представляет собой катушку индуктивности с магнитопроводом, подвижный элемент которого (якорь) перемещается под действием измеряемой величины.

*Преимущества:* нет механического износа, отсутствуют отказы, связанные с состоянием контактов, отсутствует дребезг контактов и ложные срабатывания, высокая частота переключений до 3000 Гц, устойчивы к механическим воздействиям.

*Недостатки:* сравнительно малая чувствительность, зависимость индуктивного сопротивления от частоты питающего напряжения, значительное

обратное воздействие датчика на измеряемую величину (за счет притяжения якоря к сердечнику).

Индуктивные датчики применяют как датчики скорости (частоты вращения).

**Омические (резистивные) датчики** — принцип действия основан на изменении их активного сопротивления при изменении длины  $l$ , площади сечения  $S$  или удельного сопротивления  $\rho$ :

$$R = \rho \cdot l / S.$$

Кроме того, используется зависимость величины активного сопротивления от контактного давления и освещённости фотоэлементов.

Классификация омических датчиков:

- реостатные;
- контактные;
- тензорезисторные (тензорезисторы);
- фоторезисторные;
- термометрические (терморезисторы).

**Реостатные датчики** представляют собой резистор с изменяющимся активным сопротивлением. Входной величиной датчика является перемещение контакта, а выходной — изменение его сопротивления. Подвижный контакт механически связан с объектом, перемещение (угловое или линейное) которого необходимо преобразовать.

Наибольшее распространение получила потенциометрическая схема включения реостатного датчика, в которой реостат включают по схеме делителя напряжения. Делитель напряжения — электротехническое устройство для деления постоянного или переменного напряжения на части. Делитель напряжения позволяет снимать (использовать) только часть имеющегося напряжения посредством элементов электрической цепи, состоящей из резисторов, конденсаторов или катушек индуктивности. Переменный резистор, включаемый по схеме делителя напряжения, называют потенциометром.

Обычно реостатные датчики применяют в механических измерительных приборах для преобразования их показаний в электрические величины (ток или напряжение), например в поплавковых измерителях уровня жидкостей, различных манометрах и т. п.

Датчик в виде простого реостата почти не используется вследствие значительной нелинейности его статической характеристики:

$$I_n = f(x),$$

где  $I_n$  — ток в нагрузке.

Выходной величиной такого датчика является падение напряжения  $U_{\text{вых}}$  между подвижным и одним из неподвижных контактов. Зависимость выходного напряжения от перемещения  $x$  контакта  $U_{\text{вых}} = f(x)$  соответствует закону изменения сопротивления вдоль потенциометра. Закон распределе-

ния сопротивления по длине потенциометра, определяемый его конструкцией, может быть линейным или нелинейным.

Потенциометрические датчики, конструктивно представляющие собой переменные резисторы, выполняют из различных материалов — обмоточного провода, металлических пленок, полупроводников и т. д.

**Контактные датчики** — это простейший вид резисторных датчиков, которые преобразуют перемещение первичного элемента в скачкообразное изменение сопротивления электрической цепи. С помощью контактных датчиков измеряют и контролируют усилия, перемещения, температуру, размеры объектов, контролируют их форму и т. д. К контактным датчикам относятся путевые и концевые выключатели, контактные термометры и так называемые электродные датчики, используемые в основном для измерения предельных уровней электропроводных жидкостей. Контактные датчики могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. В зависимости от пределов измерения контактные датчики могут быть однопредельными и многопредельными. Последние используют для измерения величин, изменяющихся в значительных пределах, при этом части резистора  $R$ , включенного в электрическую цепь, последовательно закорачиваются.

**Недостаток** — сложность осуществления непрерывного контроля и ограниченный срок службы контактной системы. В то же время благодаря предельной простоте этих датчиков, их широко применяют в системах автоматики.

**Тензорезисторы** служат для измерения механических напряжений, больших деформаций, вибрации. Действие тензорезисторов основано на тензоэффекте, который заключается в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов под воздействием приложенных к ним усилий.

**Фоторезисторы** изменяют свое сопротивление в зависимости от интенсивности их освещенности.

**Терморезисторы** имеют сопротивление, зависящее от температуры. Терморезисторы в качестве датчиков используют двумя способами:

- температура терморезистора определяется окружающей средой; ток, проходящий через терморезистор, настолько мал, что не вызывает нагрева терморезистора. При этом условии терморезистор используется как датчик температуры и часто называется «термометром сопротивления»;
- температура терморезистора определяется степенью нагрева постоянным по величине током и условиями охлаждения. В этом случае установившаяся температура определяется условиями теплоотдачи поверхности терморезистора (скоростью движения окружающей среды — газа или жидкости — относительно терморезистора, ее плотностью, вязкостью и температурой), поэтому он может быть использован как датчик скорости потока, теплопроводности окружающей среды, плотности газов и т. п. В датчиках

такого рода происходит как бы двухступенчатое преобразование: измеряемая величина сначала преобразуется в изменение температуры терморезистора, которое затем преобразуется в изменение сопротивления.

Терморезисторы изготавливают как из чистых металлов, так и из полупроводников. Материал, из которого изготавливаются такие датчики, должен обладать высоким температурным коэффициентом сопротивления, по возможности линейной зависимостью сопротивления от температуры, хорошей воспроизводимостью свойств и инертностью к воздействиям окружающей среды. В наибольшей степени всем указанным свойствам удовлетворяет платина, чуть в меньшей — медь и никель.

По сравнению с металлическими терморезисторами более высокой чувствительностью обладают полупроводниковые терморезисторы (термисторы).

## 7. ПРИМЕРЫ ДАТЧИКОВ

---

### 7.1. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

**В** современном промышленном производстве наиболее распространенными являются измерения температуры. Широкий диапазон измеряемых температур, разнообразие условий использования средств измерений и требований к ним определяют многообразие применяемых средств измерения температуры.

Основные классы датчиков температур промышленного применения:

- кремниевые;
- биметаллические;
- термоиндикаторы;
- термисторы;
- термопары (см. п. 6.3);
- термопреобразователи сопротивления;
- инфракрасные датчики.

Жидкостные и газовые термометры в настоящее время используются редко в связи с массовым применением термоэлектрических датчиков.

#### 7.1.1. Кремниевые датчики температуры

Чувствительным элементом этих датчиков является кристалл кремния с нанесенной на него структурой тонкопленочных резисторов. Таким образом, кремниевые датчики температуры используют зависимость сопротивления кремния от температуры. Диапазон измеряемых температур составляет от  $-50$  до  $+150$  °C. В пределах этого диапазона кремниевые датчики температуры показывают хорошую точность.

*Основное достоинство датчиков:* возможность подобрать нужный тип выходного интерфейса: напряжение, ток, сопротивление или цифровой выход, позволяющий подключать такие датчики температуры к сети передачи данных.

*Недостатки:* малый температурный диапазон и относительно большие габариты по сравнению с датчиками других типов.

Кремниевые датчики температуры применяются в основном для измерения температуры поверхности и воздуха.

**ПРИМЕР**

**Кремниевые РТС термисторы, серия КТУ82/110.215** (рис. 7.1).

Параметры термистора приведены в табл. 7.1.

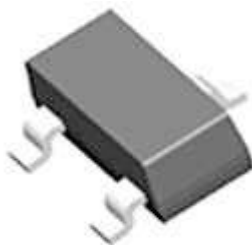


Рис. 7.1. Кремниевый термистор

Таблица 7.1

**Технические характеристики**

Параметры	Значения
Производитель	NXP Semiconductors
$R_{\min}$ , Ом	990
$R_{\max}$ , Ом	1010
Диапазон измеряемых температур, °C	от -55 до +150
Точность, °C	$\pm 1,27$
$I_{\max}$ , при $T = 25\text{ °C}$ , мА	10
$I_{\max}$ , при $T = 150\text{ °C}$ , мА	2
Время отклика в воде, с	1
Время отклика в воздухе, с	7

### 7.1.2. Биметаллические датчики температуры

Биметаллический датчик сделан из двух разнородных металлических пластин, скрепленных между собой. Разные металлы имеют различный температурный коэффициент расширения. Если соединенные в пластину металлы нагреть или охладить, то она изогнется и при этом замкнет (разомкнет) электрические контакты или переведет стрелку индикатора. Диапазон работы биметаллических датчиков от  $-40$  до  $+550\text{ °C}$ . Используются для измерения температуры поверхности твердых тел и температуры жидкостей. Основные области применения — автомобильная промышленность, системы отопления и нагрева воды.

**ПРИМЕР**

**Датчик-реле температуры ДТКБ 42–57**

Датчик-реле температуры камерный биметаллический типа ДТКБ (рис. 7.2) предназначен для двухпозиционного регулирования температуры

в камерах с неагрессивной газообразной средой при отсутствии магнитных электрических полей, действующих на магниты прибора. Датчики применяются как в промышленности, так и в быту для автоматического регулирования температуры в системах отопления и кондиционирования воздуха в различных производственных, жилых, складских помещениях, электронных устройствах в приборостроении, овощехранилищах, теплицах, гаражах, инкубаторах, холодильных камерах.



Рис. 7.2. Датчик-реле температуры

#### *Технические характеристики*

1. Зона нечувствительности (дифференциал)  $2-8^{\circ}\text{C}$ .
2. Основная допускаемая погрешность прибора для всех модификаций не превышает значений:
  - а) на средней отметке шкалы  $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ ;
  - б) на крайних отметках шкалы  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ .
 В случае изготовления приборов с фиксированной настройкой, погрешность срабатывания на крайних точках не регламентируется.
3. Постоянная времени теплового выравнивания прибора — не более 25 мин для спокойного воздуха.
4. Разрывная мощность контактов прибора не менее:
  - а) 50 Вт при напряжении 127 В постоянного тока;
  - б) 50 ВА при напряжении 220 В переменного тока и индуктивной нагрузке.
5. Электрическая изоляция приборов выдерживает в течение 1 мин при температуре окружающего воздуха  $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности не более 80 % напряжение 2000 В переменного тока частотой 50 Гц.
6. Сопротивление изоляции электрических цепей прибора между собой и относительно корпуса соответствует:
  - а) при температуре окружающего воздуха  $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$  в относительной влажности не более 80 % — не менее 20 МОм;
  - б) при повышенной влажности 95 % и температуре  $+35^{\circ}\text{C}$  — не менее 2 МОм.
7. Относительная влажность окружающей среды 30–80 %.
8. Масса 0,3 кг.

### 7.1.3. Термоиндикаторы

Термоиндикаторы — это особые вещества, изменяющие свой цвет под воздействием температуры. Изменение цвета может быть обратимым и необратимым. Производятся в виде пленок.

### 7.1.4. Термопреобразователи сопротивления

Принцип действия основан на изменении электрического сопротивления проводников и полупроводников в зависимости от температуры (рассмотрен ранее).

Платиновые терморезисторы предназначены для измерения температур в пределах от  $-260$  до  $1100$  °С. Широкое распространение на практике получили более дешевые медные терморезисторы, имеющие линейную зависимость сопротивления от температуры.

Недостатком меди является ее небольшое удельное сопротивление и легкая окисляемость при высоких температурах, вследствие чего предел применения медных термометров сопротивления ограничивается температурой  $180$  °С. По стабильности и воспроизводимости характеристик медные терморезисторы уступают платиновым. Никель используется в недорогих датчиках для измерения в диапазоне комнатных температур.

Полупроводниковые терморезисторы (термисторы) имеют отрицательный или положительный температурный коэффициент сопротивления, значение которого при  $20$  °С составляет  $(2-8) \cdot 10^{-2}$  (°С) $^{-1}$ , т. е. на порядок больше, чем у меди и платины. Полупроводниковые терморезисторы при весьма малых размерах имеют высокие значения сопротивления (до  $1$  МОм). В качестве полупроводникового материала используются оксиды металлов: полупроводниковые терморезисторы типов КМТ (смесь оксидов кобальта и марганца) и ММТ (меди и марганца).

Полупроводниковые датчики температуры обладают высокой стабильностью характеристик во времени и применяются для измерения температур в диапазоне от  $-100$  до  $+200$  °С.

#### ПРИМЕР

#### Термопреобразователи сопротивления ДТС-ЕХ типа ТСМ

Данные преобразователи (рис. 7.3) предназначены для непрерывного измерения температуры различных рабочих сред (пар, газ, вода, сыпучие материалы, химические реагенты и т. п.), неагрессивных к материалу корпуса датчика. Могут применяться для измерения температуры взрывоопасных смесей газов, паров, а также легковоспламеняющихся и взрывчатых веществ. Характеристики ДТС-ЕХ приведены в табл. 7.2.





Рис. 7.3. Термопреобразователи сопротивления

Таблица 7.2

Технические характеристики

Параметры	Значения
Номинальная статическая характеристика (НСХ)	50П, 100П, Pt100
Рабочий диапазон измеряемых температур, °С	от –50 до +250
Класс допуска	А, В, С
Группа климатического исполнения	Д2, Р2
Условное давление, МПа	10
Величина рабочего тока, не более, мА	5
Показатель тепловой инерции, не более, с	10–30
Сопротивление изоляции, не менее, МОм	100
Схема соединения внутренних проводников	2, 3, 4-проводная
Степень защиты	ГОСТ 14254 IP54
Материал арматуры	Сталь 12Х18Н10Т (мод. 024, 044–184)
Маркировка взрывозащиты	0ExiaIIС Т1–Т6

### 7.1.5. Инфракрасные датчики (пирометры)

Инфракрасные датчики (пирометры) используют энергию излучения нагретых тел, что позволяет измерять температуру поверхности на расстоянии. Пирометры делятся на радиационные, яркостные и цветовые.

**Радиационные пирометры** используются для измерения температуры от 20 до 2 500 °С, причем прибор измеряет интегральную интенсивность излучения реального объекта.

**Яркостные (оптические) пирометры** используются для измерения температур от 500 до 4 000 °С. Они основаны на сравнении в узком участке спектра яркости исследуемого объекта с яркостью образцового излучателя (фотометрической лампы).

**Цветовые пирометры** основаны на измерении отношения интенсивностей излучения на двух длинах волн, выбираемых обычно в красной или синей части спектра; они используются для измерения температуры в диапазоне от 800 °С.

Пирометры позволяют измерять температуру в труднодоступных местах, температуру движущихся объектов, а также высокие температуры, где другие датчики уже не работают.

Пирометр состоит из двух блоков: оптической головки и блока обработки сигнала, соединенных между собой оптоволоконным кабелем, по которому передается инфракрасное излучение от объекта контроля. Оптоволоконный кабель не чувствителен к воздействию электромагнитных полей, поэтому оптоволоконные датчики предоставляют достаточно точную информацию, благодаря чему становятся все более популярны. Металлорукав из нержавеющей стали защищает оптоволоконный кабель от механических ударов и влияния агрессивной окружающей среды.

### ПРИМЕР

#### Пирометр DT-8819

Профессиональные пирометры с лазерным целеуказателем (рис. 7.4). Характеристики его приведены в табл. 7.3.



Рис. 7.4. Пирометр

Таблица 7.3

Технические характеристики

Параметры	Значения
Оптическое разрешение	12:1
Температура, °C	50–750
Температура, F	от -58 до 1382
Дисплей	Двойной с подсветкой, автоматическое удержание показаний AUTO HOLD после отпускания кнопки измерений
Коэффициент излучения измеряемых поверхностей	0,95
Время отклика, не менее, с	1
Разрешающая способность	0,1°–200°, 1°–свыше 200°
Погрешность, %	± 1,5
Габариты, мм	100×56×230
Вес, г	290
Питание, В	9

## 7.2. ОПТОВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ

Принцип действия обобщенного волоконно-оптического датчика состоит в следующем:

- 1) оптическое излучение от источника проходит через передающий оптический канал на чувствительный элемент (ЧЭ), находящийся под воздействием измеряемой величины;
- 2) в результате физического воздействия оптические свойства ЧЭ изменяются, что, в свою очередь, приводит к изменению параметров оптического излучения;
- 3) далее преобразованное оптическое излучение через приемный оптический канал поступает на регистрирующее устройство.

По принципу действия все волоконно-оптические датчики физических величин делятся на четыре класса в соответствии с тем, какой из параметров оптической волны, распространяющейся по волокну, используется для получения информации об измеряемом физическом воздействии:

- амплитуда электрического поля  $E_m$ ;
- фаза  $\varphi$ ;
- состояние или направление поляризации электрического вектора  $p$ ;
- частота  $\omega$ .

Следовательно, оптоволоконные датчики по принципу кодирования можно разделить на группы оптоволоконных технологий:

- фазовая (с когерентным источником излучения);
- амплитудная;
- поляризационная.

### 7.2.1. Фазовая оптоволоконная технология

Описание принципов работы данной технологии затруднено вследствие их сложности и малого объема указаний. По этой причине ниже перечислены названия принципов действия и их особенности. В САУ широкого применения таких датчиков ожидать не приходится из-за их сложности и излишне большой разрешающей способности.

Принципы действия:

- на основе интерферометров Фабри-Перо, Маха-Цандера, Майкельсона;
- на решетке Брэгга.

*Преимущества:* чрезвычайно высокая точность.

*Недостатки:* чувствительность к флуктуациям входного излучения, возможность только относительных измерений, необходимость использования фазокомпенсирующих элементов, сложность в изготовлении.

*Перспективы коммерциализации:* недостатки, основным из которых яв-

ляется чувствительность к флуктуациям входного излучения, не позволяют наладить массовое производство, за исключением волоконных гироскопов.

### **7.2.2. Амплитудная оптоволоконная технология**

Принцип действия основан на прохождении света через чувствительный элемент. Волоконно-оптические датчики данного типа делятся на два класса:

- отражательные;
- проходные.

С точки зрения функциональных особенностей разработаны датчики с оптическим преобразователем на конце волокна и датчики, в которых оптическое волокно используется только в качестве зонда, подводящего и отводящего оптическое излучение от исследуемого объекта.

Волокнисто-оптические датчики могут быть использованы как датчики:

- перемещений;
- давления;
- акустических колебаний;
- температуры;
- вибраций (виброметры);
- ускорения (акселерометры).

*Преимущества:* просты в изготовлении, дешевы.

*Недостатки:* чувствительность к флуктуациям входного излучения, возможность только относительных измерений, низкая точность.

*Перспективы коммерциализации:* недостатки, основными из которых являются чувствительность к флуктуациям входного излучения и малая точность измерений, не позволяют наладить массовое производство.

### **7.2.3. Поляризационная оптоволоконная технология**

Принцип действия: изменение состояния поляризации луча в оптоволоконном кабеле.

*Преимущества:* высокая точность.

*Недостатки:* необходимость использования дорогого волокна с сохранением поляризации.

*Перспективы коммерциализации:* высокая себестоимость и сложность изготовления не позволяют широко коммерциализировать технологию.

## **ПРИМЕР**

**Датчик серии BF3R** (рис. 7.5).

Высокоточный оптоволоконный датчик с дискретным выходом с грубой и точной регулировкой чувствительности. Реагирует на наличие или отсутствие предмета на отраженный световой сигнал или на проходящий.



Рис. 7.5. Оптоволоконный датчик

*Технические характеристики*

1. Корпус для монтажа на DIN-рейку.
2. Высокое быстродействие, т. к. время срабатывания составляет не более 1 мс.
3. Высокая точность настройки чувствительности с помощью сдвоенного регулятора.
4. Выбор режима срабатывания на свет или на затемнение происходит путем коммутации управляющего входа.
5. Защита от переплюсовки цепей питания и от короткого замыкания (перегрузки по току) осуществляется на выходе.
6. Возможность использования во взрывоопасных зонах, т. к. имеется оптоволоконная часть.
7. Возможность изменения длины для оптоволоконных кабелей со свободным срезом.
8. Время реакции — максимальное 1 мс.
9. Источник питания (12–24) В =  $\pm 10\%$ , т. е. максимальная пульсация составляет 10%.
10. Потребление тока — максимальное 40 мА.
11. Модулированный источник света — красный светодиод.
12. Регулировка чувствительности осуществляется потенциометром, возможна двойная настройка: грубая и тонкая.
13. Режим работы: реакция на свет или затемнение, выбор режима происходит при помощи провода.
14. Выход с открытым коллектором, NPN.
15. Напряжение нагрузки составляет 30 В.
16. Ток нагрузки — максимальный 200 мА.
17. Остаточное напряжение — максимальное 1 В.
18. Схема защиты от обратной полярности и от короткого замыкания.
19. Индикатор срабатывания — красный светодиод.
20. Подсоединение — через выходной кабель длиной 2 м.
21. Габаритные размеры: 15×39×73 мм.

### 7.3. РАСХОДОМЕРЫ

Расходомер — прибор, измеряющий расход вещества, проходящего через данное сечение трубопровода в единицу времени (рис. 7.6). Если прибор имеет интегрирующее устройство со счетчиком и служит для одновременного измерения и количества вещества, то его называют расходомером со счетчиком.

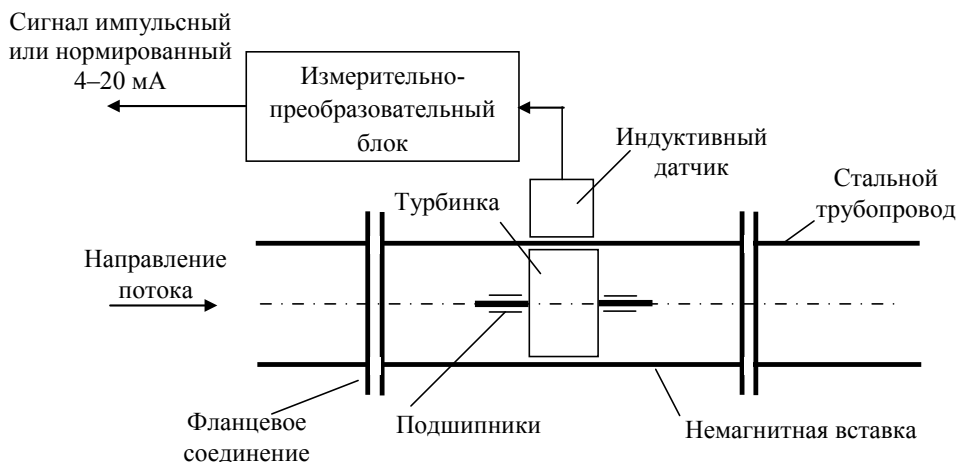


Рис. 7.6. Структурная схема турбинного расходомера ТМ44

Расходомеры бывают следующих типов:

- механические счетчики расхода;
- перепадомеры (рис. 7.7);
- ультразвуковые:
  - ультразвуковые времяимпульсные;

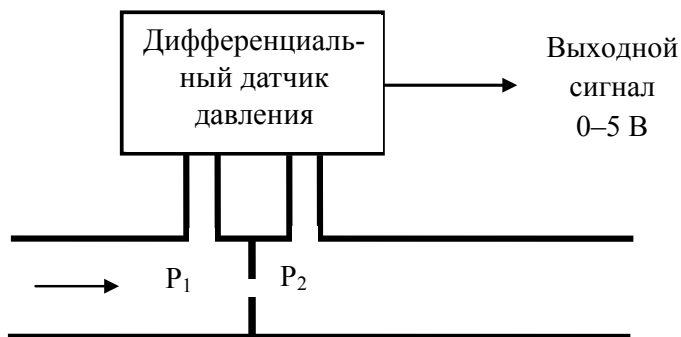


Рис. 7.7. Принцип измерения диафрагменным расходомером:

$P_1$  и  $P_2$  — давление до и после диафрагмы в трубопроводе (разность давлений зависит от расхода и диаметра диафрагмы)

- ультразвуковые фазового сдвига;
- ультразвуковые доплеровские;
- ультразвуковые корреляционные;
- электромагнитные расходомеры;
- кориолисовые;
- вихревые;
- тепловые;
- тепловые расходомеры пограничного слоя;
- калориметрические расходомеры;
- меточные расходомеры.

### ПРИМЕР

**Датчик расхода жидкости ультразвуковой Dymetic—1204 (рис. 7.8).**



Рис. 7.8. Датчик расхода жидкости

Предназначен для измерения объема воды, закачиваемой в нагнетательные скважины систем поддержания пластового давления на нефтяных месторождениях или используемой в сетях водоснабжения промышленных предприятий и организаций и объектов коммунального хозяйства.

Принцип действия датчика основан на «просвечивании» потока жидкости колебаниями ультразвуковой частоты пьезоэлектрическими ультразвуковыми преобразователями, работающими попеременно в режимах «приемник—излучатель». Задержка времени распространения ультразвукового сигнала по потоку и против потока жидкости пропорциональна скорости (объемному расходу) жидкости в проточной части датчика. Электронная схема осуществляет управление ультразвуковыми преобразователями, обработку их сигналов, детектирование, масштабирование, цифровую фильтрацию и формирование выходных сигналов. Конструктивно датчик представляет собой моноблок, состоящий из проточной части, стойки и корпуса

с размещенной в нем электронной схемой, защищенной крышкой. Характеристики расходомера приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

## Технические характеристики

Параметры	Значения
Рабочее давление, МПа	1,6–20
Потеря давления на максимальном расходе, не более, МПа	0,005
Рабочая жидкость — вода при температуре, °С	от +4 до +15
Температура окружающей среды, °С	от — 45 до + 50
Предел основной относительной погрешности измерений, %	$\pm 1,5$ ; $\pm 2,5$
Потребляемая мощность, не более, Вт	6
Питание датчика от источника постоянного тока напряжением, В	20,4–27,6
Низкое сопротивление выходной цепи, не более, Ом	300
Высокое сопротивление выходной цепи, не менее, Ом	50 000
Предельно допускаемый ток нагрузки, А	$50 \cdot 10^{-3}$
Предельно допустимое коммутируемое напряжение, В	30
Длина линии связи, не более, м	300

## 7.4. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Датчик давления — устройство, физические параметры которого изменяются в зависимости от давления жидкости или газа. В датчиках давление преобразуется в электрический сигнал или цифровой код.

Датчики давления находят широкое применение в системах управления технологическими процессами. Давление — один из важнейших параметров многих производственных циклов.

Датчик давления состоит из первичного преобразователя давления, в составе которого чувствительный элемент и приемник давления, схемы вторичной обработки сигнала, различных по конструкции корпусных деталей и устройства вывода. Основным отличием одних приборов от других является точность регистрации давления, которая зависит от принципа преобразования давления в электрический сигнал: тензометрический, пьезорезистивный, емкостной, резонансный, индуктивный, ионизационный.

### Тензометрический метод

Чувствительные элементы датчиков базируются на принципе измерения деформации тензорезисторов, припаянных к титановой мембране, которая деформируется под действием давления.

### Пьезорезистивный метод

Основан на интегральных чувствительных элементах из монокристаллического кремния. Кремниевые преобразователи имеют высокую времен-



ную и температурную стабильность. Для измерения давления чистых неагрессивных сред применяются так называемые Low cost — решения, основанные на использовании чувствительных элементов либо без защиты, либо с защитой силиконовым гелем. Для измерения агрессивных сред и большинства промышленных применений используется преобразователь давления в герметичном металlostеклянном корпусе с разделительной диафрагмой из нержавеющей стали, передающей давление измеряемой среды посредством кремнийорганической жидкости (рис. 7.9).

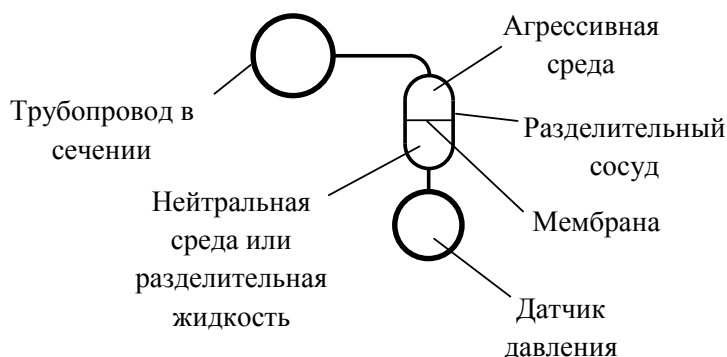


Рис. 7.9. Датчик давления агрессивных сред с разделительной диафрагмой

### Емкостной метод

Емкостные преобразователи используют метод изменения ёмкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Известны керамические или кремниевые емкостные первичные преобразователи давления и преобразователи, выполненные с использованием упругой металлической мембраны. При изменении давления мембрана с электродом деформируется и происходит изменение емкости. В элементе из керамики или кремния пространство между обкладками обычно заполнено маслом или другой органической жидкостью. Недостаток — нелинейная зависимость емкости от приложенного давления.

### Резонансный метод

В основе метода лежат волновые процессы: акустические или электромагнитные. Частота резонанса акустической или электромагнитной системы зависит от геометрии высокочастотного резонатора, меняющейся от приложенного давления. Характеризует высокую стабильность датчиков и высокие выходные характеристики прибора. К недостаткам можно отнести индивидуальную характеристику преобразования давления, значительное время отклика, невозможность проводить измерения в агрессивных средах без потери точности показаний прибора.

### **Индуктивный метод**

Основан на регистрации вихревых токов (токов Фуко). Чувствительный элемент состоит из двух катушек, изолированных между собой металлическим экраном. Преобразователь измеряет смещение мембраны при отсутствии механического контакта. В катушках генерируется электрический сигнал переменного тока таким образом, что заряд и разряд катушек происходит через одинаковые промежутки времени. При отклонении мембраны создается ток в фиксированной основной катушке, что приводит к изменению индуктивности системы. Смещение характеристик основной катушки дает возможность преобразовать давление в стандартизованный сигнал, по своим параметрам прямо пропорциональный приложенному давлению.

### **Ионизационный вакуумметрический метод**

В основе лежит принцип регистрации потока ионизированных частиц. Аналогом являются ламповые диоды. Лампа оснащена двумя электродами: катодом и анодом, а также нагревателем. В некоторых лампах нагреватель отсутствует, что связано с использованием более совершенных материалов для электродов. Преимуществом таких ламп является возможность регистрировать низкое давление — вплоть до глубокого вакуума — с высокой точностью. Однако следует строго учитывать, что подобные приборы нельзя эксплуатировать, если давление в камере близко к атмосферному. Поэтому подобные преобразователи необходимо сочетать с другими датчиками давления, например емкостными. Зависимость сигнала от давления является логарифмической.

### **Регистрация сигналов датчиков давления**

Сигналы с датчиков давления являются медленноменяющимися. Это значит, что их спектр лежит в области сверхнизких частот. Для того чтобы с высокой точностью оцифровать такой сигнал, необходимо подавить высокочастотную часть спектра, полностью состоящую из помех. Это особенно актуально в промышленных условиях. Специально для ввода медленноменяющихся сигналов используются интегрирующие АЦП. Они проводят измерение не мгновенного значения сигнала (которое изменяется под действием помех), а интегрируют сигнальную функцию за заданный промежуток времени, который заведомо меньше постоянной времени процессов, происходящих в контролируемой среде, но заведомо больше периода самой низкочастотной помехи. Интегрирующие АЦП выпускают многие зарубежные фирмы (Texas Instruments, Analog Devices и др).

В отличие от датчика давления, манометр — прибор, предназначенный для измерения, а не преобразования давления. В манометре от давления зависят показания прибора, которые могут быть считаны со шкалы его дисплея или аналогичного устройства.

## ПРИМЕР

**Датчик давления DMP 331 (ДМП 331)** (рис. 7.10).



Рис. 7.10. Датчик давления DMP 331

Универсальный датчик давления для различных отраслей промышленности, пропорционально преобразующий давление рабочей среды в электрический сигнал. Благодаря широкому диапазону измерения, датчик DMP 331 применим для решения широкого круга задач. Датчик рассчитан на измерение абсолютного или избыточного давления — как статического, так и динамического. Диапазоны давления — 0,04–40 бар. Другие характеристики этого датчика приведены в табл. 7.5. Корпус датчика изготовлен из нержавеющей стали 1.4571 и 1.4435.

Таблица 7.5

### Технические характеристики

Параметры	Значения
Основная погрешность, % ВПИ	0,5/0,35/0,25/0,2/0,1
Выходной сигнал	0/4–20 мА, 0–10 В, 0–5 В и др. (опция: Ex-исполнение)
Сенсор	Кремниевый пьезорезистивный
Диапазон температур измеряемой среды	от -25 до +125 °С
Класс защиты	IP 65–68
Механическое присоединение	M10×1, M12×1, M20×1.5, G¼", G½", ¼" NPT, ½" NPT
Электрическое присоединение	DIN 43650, Binder 723 (5 конт.), M12x1 (4 конт.), кабельный ввод PG7, Busscaneer

### Области применения:

- пневматика, гидравлика;
- технологические процессы;
- охрана окружающей среды;
- измерительное оборудование;
- пищевая промышленность (с торцевой мембраной);
- коммунальное хозяйство.

## 7.5. ДАТЧИКИ УРОВНЯ

Уровнемер — прибор, предназначенный для определения уровня содержимого в открытых и закрытых резервуарах, хранилищах и т. д. Под содержимым подразумеваются разнообразные виды жидкостей, в том числе и газообразующие, а также сыпучие и другие материалы. Уровнемеры также называют датчиками/сигнализаторами уровня, преобразователями уровня. Главное отличие уровнемера от сигнализатора уровня — это возможность измерять градации уровня, а не только его граничные значения.

В промышленном производстве в настоящее время существует разнообразный ряд технических средств, решающих задачу измерения и контроля уровня. Средства измерения уровня реализуют разнообразные методы, основанные на различных физических принципах.

Наиболее распространённые методы измерения уровня, которые позволяют преобразовать значение уровня в электрическую величину и передавать её значение в системы АСУ ТП:

- контактные (волноводный, поплавковый, ёмкостной, гидростатический, буйковый);
- бесконтактные (зондирование звуком, зондирование электромагнитным излучением, зондирование радиационным излучением).

С развитием измерительной техники каждый метод приобретает характерный набор своих технических реализаций, которые в каждом конкретном случае имеют как преимущества, так и недостатки.

### ПРИМЕР

#### **Ультразвуковой датчик уровня фирмы VETUS (рис. 7.11)**

Датчик позволяет бесконтактным способом определять уровень жидкости в любом резервуаре на борту судна. После размещения датчика в выбранном резервуаре он может быть простым образом откалиброван. Калибровка датчика выполняется с помощью светодиода и калибровочного провода, внешнее вспомогательное оборудование для этого не требуется.

Датчик может устанавливаться в резервуаре любого вида и любых размеров. К датчику можно подключать стандартные аналоговые измерительные приборы фирмы VETUS (в том числе и блок контроля сточных вод WWCP). Пригоден для следующих жидкостей: бензин, дизельное топливо, питьевая вода, «черные» и «серые» сточные воды. Его характеристики приведены в табл. 7.6.



Рис. 7.11. Датчик уровня фирмы VETUS

Таблица 7.6

Технические характеристики

Параметры	Значения
Напряжение питания, В	12/24
Потребление тока, мА	4
Интерфейс	Аналоговый
Рабочий диапазон, см	80
Погрешность, %	+/- 5
Рабочий температурный диапазон, °C	от -20 до +70
Корпус	Сталь SAE 5

## 7.6. ПОЗИЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ. ДАТЧИКИ РАССТОЯНИЯ

Самые первые бесконтактные датчики расстояния выдавали информацию только лишь о наличии или отсутствии предмета перед датчиком в виде дискретного сигнала ON/OFF. Эти простейшие датчики до сих пор находят применение в различных областях промышленности. В то же время для решения более сложных задач автоматизации технологических процессов инженерам нужна дополнительная информация о положении объектов измерения. Для этих целей были разработаны датчики, позволяющие определять расстояние до объекта и его положение с помощью аналогового выхода, сигнал на котором пропорционален расстоянию до измеряемого объекта. Такие датчики могут использоваться для определения расстояния до объекта, измерения толщины, измерения наклона и деформации, измерения профиля изделия, центровки и измерения диаметра.

В табл. 7.7 представлены основные типы аналоговых бесконтактных датчиков для измерения расстояний и их основные особенности.

Таблица 7.7

**Основные типы аналоговых бесконтактных датчиков  
для измерения расстояний**

Параметры	Типы датчиков			
	Индуктивные	Ультразвуковые	Оптические	
			триангуляционные	радарные
Расстояние, мм	0–20	10–10 000	10–1 000	10–500 000
Разрешение	0,1 мкм	0,1 мм	1 мкм	0,5 мм
Точность, мкм	1	200	2	2000
Линейность, %	0,4–5	0,5	0,05–1	0,001
Время, мс	0,3	20	1	1

**Индуктивные датчики.** Индуктивные датчики расстояния определяют расстояния до проводящих металлических объектов, таких как сталь, алюминий, латунь. Поскольку принцип работы индуктивных датчиков основан на определении токов взаимной индукции, эти датчики очень устойчивы к воздействию немаetalлических предметов и помех, таких как, например, пыль или машинное масло. Современные технологии позволяют создать индуктивный датчик с аналоговым выходом, имеющий диаметр всего 6 мм при измеряемом расстоянии 2 мм. Такие датчики с высоким разрешением и быстрым временем отклика находят применение в большинстве высокоскоростных задач.

**Ультразвуковые датчики.** Принцип действия ультразвуковых датчиков расстояния основан на излучении импульсов ультразвука и измерении интервала времени, пока звуковой импульс, отразившись от объекта измерения, вернется обратно в датчик. При этом достигается разрешение до 0,2 мм.

Наиболее важной особенностью применения ультразвуковых датчиков является их возможность измерять расстояния до сложных объектов, таких как сыпучие вещества, жидкости, гранулы, прозрачные или, напротив, сильно отражающие поверхности. В дополнение ультразвуковыми датчиками можно измерять сравнительно большие расстояния, при этом сохраняя их небольшие размеры, что может быть существенно для ряда применений.

Однако и ультразвуковые датчики имеют ряд ограничений. Прежде всего — это пена и другие объекты, сильно поглощающие ультразвуко-

вые колебания. Такое поглощение значительно уменьшает измеряемую дистанцию. Сильно изогнутые поверхности также снижают расстояние и точность измерений, поскольку рассеивают ультразвуковые колебания в различных направлениях. Ультразвуковые датчики излучают импульс в виде широкого конуса, что также ограничивает возможность измерения расстояния до небольших объектов, увеличивая уровень помех от других объектов, которые могут находиться в поле зрения датчика. Некоторые ультразвуковые датчики имеют конус с углом всего  $5^\circ$ . Это позволяет использовать их для измерения намного меньших объектов, например таких, как бутылки или ампулы.

**Оптические датчики.** Существует множество различных способов измерить расстояние до предмета с помощью оптики (например, лазерные интерферометры, датчики с рассеянным отражением света и оптические датчики радарного типа). Каждый из видов датчиков имеет свои сильные и слабые стороны. Лазерные интерферометры имеют большой диапазон измерений и точность несколько нанометров, однако эти приборы очень дорогие и сложные в эксплуатации. Датчики с рассеянным отражением и аналоговым выходом могут измерять расстояния в широких пределах, однако поскольку они работают с отраженным светом, то могут быть проблемы с измерением расстояний до окрашенных или отражающих объектов. Оптические датчики радарного типа, преимущественно лазерные, могут измерять большие расстояния, однако принцип их работы, основанный на измерении времени распространения света от датчика до объекта и обратно, позволяет измерять с ограниченным разрешением в 2–3 мм.

Подавляющее большинство задач по измерению в промышленности приходится на диапазоны от долей микрон до нескольких десятков метров. При этом датчики должны работать с объектами, далекими от идеальных: малого размера, имеющих различный цвет, сложную структуру поверхности и перемещающихся с высокой скоростью. Для таких целей наиболее подходят лазерные датчики расстояния, работающие по принципу оптической триангуляции.

На рис. 7.12 показан принцип работы оптического датчика расстояния. Лазер посылает через линзу луч, который отражается от объекта и фокусируется на линейке из фотодиодов, преобразующей световой сигнал в электрический. Всякое изменение расстояния до объекта вызывает изменение угла отраженного луча и, следовательно, позиции, которую отраженный луч занимает на линейке фотодиодов. Микроконтроллер обрабатывает сигнал от линейки фотодиодов и преобразует его в аналоговый электрический сигнал.

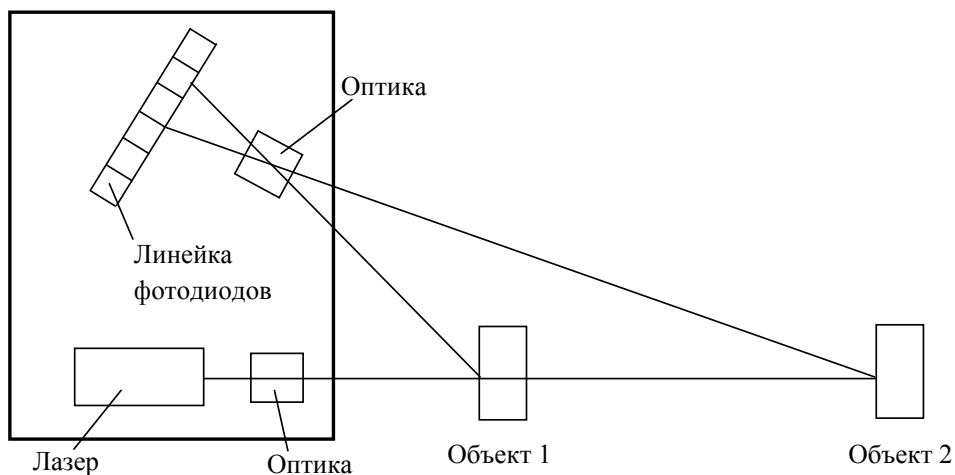


Рис. 7.12. Принцип работы триангуляционного оптического датчика расстояния

Наиболее важное качество таких датчиков расстояния — это сочетание высокой точности измерения и больших измеряемых расстояний. Большинство производителей предлагают датчики с разрешением от 1 мкм до 1 мм. Однако высокая точность возможна только на относительно коротких расстояниях, так что, например, точность в 1 мкм на расстояниях в 1 метр получить вряд ли удастся.

Для снижения влияния шумов все лазерные датчики расстояний могут формировать интегральные или усредненные значения измерений. При этом производится множество измерений расстояния до объекта, и результат потом усредняется, тем самым повышается точность измерений. Однако большая точность требует большого количества измерений, увеличивая при этом общее время измерения. Так, например, чтобы обеспечить точность в 1 мкм, типичное время измерения составляет порядка 0,1 с.

Существует несколько основных критериев выбора датчика расстояния:

- характеристика объекта измерения (из чего состоит объект измерения);
- расстояние до объекта;
- требуемая точность;
- скорость движения объекта измерения;
- внешние неблагоприятные условия;
- тип выходного сигнала;
- ограниченность пространства для установки датчика.



## ПРИМЕР

**Оптический датчик расстояния IFM Electronic серии O1DL (рис. 7.13).**



Рис. 7.13. Датчик расстояния

Датчики IFM Electronic для дистанционного измерения расстояния работают по принципу измерения времени пролета светового луча. Световой луч излучается из датчика и отражается от объекта; время, которое луч света затратил на прохождение пути от датчика до объекта и обратно, измеряется. Поскольку скорость света — величина постоянная, то по времени прохождения луча можно рассчитать расстояние до объекта измерения. Приемник датчиков расстояния IFM Electronic имеет конструкцию Sytem-on-Chip (система на чипе), датчик и электроника для обработки сигнала объединяются на одном кремниевом кристалле, называемом Photonic Mixer Device (PMD). Достоинства такого датчика — компактная конструкция, подходящая для промышленного использования, и отличные технические характеристики. Дальномеры IFM Efector 200 можно использовать для измерения уровня и позиционирования объектов (например, для определения местоположения электрокаров в многоярусных складских помещениях или для предотвращения столкновений автономных промышленных транспортных средств). Характеристики датчика приведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

### Технические характеристики

Параметры	Значения
Тип	Лазерный датчик расстояния (видимый лазерный луч 650 нм, класс 2)
Диапазон измерений, м	0,2–10, 1–75 с отражателем
Точность, мм	15
Частота измерений, Гц	1–50
Температура эксплуатации, °C	от –10 до +60
Функция на выходе	DC PNP (NPN) NO/NC, (4–20) мА, (0–10) В
Питание	DC
Материал корпуса	Литье из цинка, стекло, светодиодное окно

## 7.7. ДАТЧИКИ ВРЕМЕНИ

Датчики предназначены для выделения информации о точном времени, передаваемой в составе радиосигнала, подаваемого на вход IN VT1 датчика. Выходной тайм-код отображается на внешней панели индикации.

Датчик времени выполнен в виде модуля (печатной платы), который размещается в корпусе цифровой измерительной системы (рис. 7.14). Питание датчика осуществляется от блока питания, размещенного в том же корпусе.

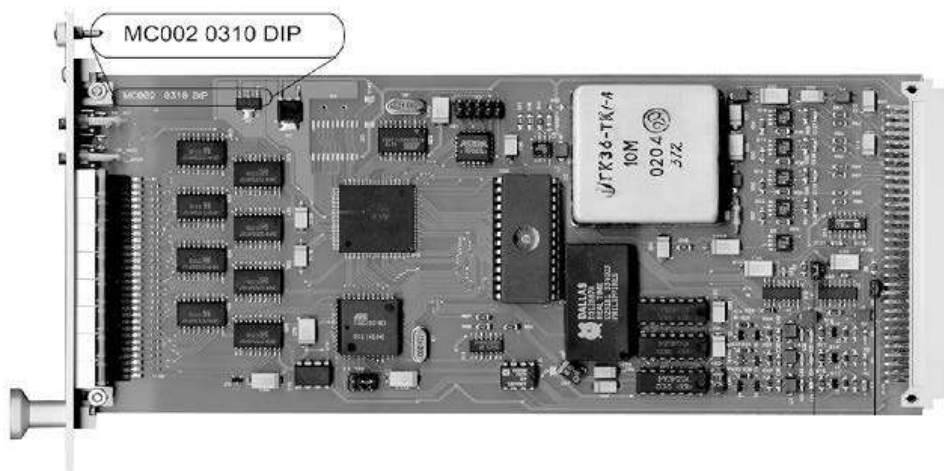


Рис. 7.14. Датчик времени

## 7.8. ДАТЧИКИ ТОКА

Датчики тока предназначены для измерения постоянного или переменного тока с гальванической развязкой силовой цепи и цепей контроля.

Конструкция датчика тока включает в себя магнитопровод с зазором и компенсационной обмоткой, датчик Холла и электронную плату обработки сигналов. Магниточувствительный датчик Холла закреплен в зазоре магнитопровода и соединен с входом электронного усилителя.

При протекании измеряемого тока по шине, охватываемой магнитопроводом, в последнем наводится магнитная индукция. Датчик Холла, реагирующий на возникшее магнитное поле, вырабатывает напряжение, пропорциональное величине наведенной магнитной индукции. Выходной сигнал с датчика усиливается электронным усилителем и подается в компенсационную обмотку. В результате по обмотке течет компенсационный ток, пропорциональный измеряемому току по величине и со-

ответствующий ему по форме. Возникающее при этом магнитное поле компенсационной обмотки компенсирует магнитное поле измеряемого тока, и датчик Холла работает как нуль-орган. При этом полоса частот, пропускаемая таким датчиком тока, составляет от 0 Гц (постоянный ток) до 200 кГц.

**Датчики переменного тока.** В целях удешевления приборов была разработана и серийно изготавливается линейка датчиков для измерения только переменных токов промышленной частоты 50 Гц. Такие датчики состоят из трансформатора тока и электронной платы обработки сигнала. Для удобства потребителей могут быть изготовлены различные варианты датчиков, отличающиеся формой выходного сигнала:

вариант 1 — на выходе датчика напряжение, пропорциональное измеряемому току;

вариант 2 — на выходе датчика напряжение, пропорциональное действующему значению измеряемого тока;

вариант 3 — стандартный токовый выход 4/20 мА (0/20 мА), пропорциональный действующему значению измеряемого тока.

**Разъемные датчики тока.** При проведении мониторинга действующего электрооборудования, при ремонтных работах на предприятиях с непрерывным циклом работы и в ряде других случаев требуются датчики тока, которые бы допускали их установку без разрыва токовых цепей. Для этих целей разработаны и выпускаются разъемные датчики измерения тока, т. е. датчики, которые непосредственно собираются и устанавливаются на токовой шине. Пример датчиков на разные пределы по измеряемому току:

- датчик измерения постоянного и переменного тока до 1 500 А, предназначенный для монтажа на плоскую шину 80×10 мм;
- датчик измерения переменного тока 90 А с окном 19×19 мм.

## ПРИМЕР

**Датчик типа CSNC241** (рис. 7.15). Характеристики даны в табл. 7.9.



Рис. 7.15. Датчик тока

Таблица 7.9

## Технические характеристики

Параметры	Значение
Тип подключения к измеряемой цепи	Бесконтактный
Выход	Линейный
Максимальный допустимый ток, А	90
Измерение постоянного тока $I_{\text{пост}}$	Да
Измерение переменного тока $I_{\text{пер}}$	Да
Измерение импульсного тока $I_{\text{имп}}$	Да
Напряжение питания, В	12
Минимальная чувствительность, мВ/ (А·виток)	100
Время отклика, мс	1
Рабочая температура, °С	от –40 до +85
Максимальный выходной ток, мА	25
Производитель	Honeywell Inc.

## 7.9. GPS

**GPS** (Global Positioning System) — это спутниковая навигационная система, позволяющая с точностью до 100 м определить местоположение объекта: его широту, долготу, высоту над уровнем моря, а также направление и скорость его движения. Кроме того, с помощью GPS можно определить время с точностью до 1 нс.

GPS состоит из работающих в единой сети 30 спутников, находящихся на 6 орбитах высотой около 20 000 км над поверхностью Земли. Спутники постоянно движутся со скоростью около 3 км/с, совершая два полных оборота вокруг планеты менее чем за 24 часа. На борту каждого спутника установлены атомные часы, обеспечивающие точность  $10^{-9}$  с, вычислительно-кодирующее устройство и передатчик мощностью 50 Вт.

*GPS-приёмник* — это прибор, позволяющий определить местоположение в любой точке: на суше, на море и в околоземном пространстве. Исполнение GPS-приемников весьма разнообразно. В целом весь спектр моделей можно разделить на четыре большие группы:

- портативные (индивидуального применения);
- автомобильные;
- морские;
- авиационные.

# ПРИМЕР

GPS-приемник **Garmin Oregon 200** (рис. 7.16). Характеристики даны в табл. 7.10.



Рис. 7.16. GPS

Таблица 7.10

## Технические характеристики

Параметры	Значения
Количество путевых точек	1000
Количество маршрутов/точек в маршруте	50
Емкость путевого журнала (Tracklog)	10 000 точек, 20 треков
Дисплей	
Количество цветов	65 000
Разрешение, пикс.	240×400
Подсветка	Есть
Физический размер, см	3,8×6,3
Сенсорный	Есть
Коммуникации	
USB	Есть
Память	
Встроенная память, доступная пользователю, Mb	24
Поддержка карт памяти, Mb	microSD™ card (1Gb в комплекте)
Питание	
Тип аккумулятора	2 батарейки AA (не входят в комплект поставки), NiMH или Lithium рекомендованы

Окончание табл. 7.10

Параметры	Значения
Время непрерывной работы, ч	16
Возможность подключения внешнего питания	Порт USB
Внешние характеристики	
Корпус	Влагозащищенный IPX7
Вес, г	193 (с батареями)
Размер, см	5,8×11,4×3,5

## 7.10. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ДАТЧИКОВ

Существуют разнообразные способы соединения датчиков: сквозное, шинное, звездообразное.

**Сквозное соединение датчиков (релейное).** Пропускаются через себя провода, опрашиваются вызовом (рис. 7.17). Используются по принципу: любой сработал — тревога. Подразумевается возможность модуляции сигнала и адресации. По приему адреса включает к себе питание. Получается, что в одно время работает только один датчик, потом он опять «засыпает» и потребляет небольшой ток — единицы микроампер. Это позволяет увеличить ресурс работы при аккумуляторном питании.

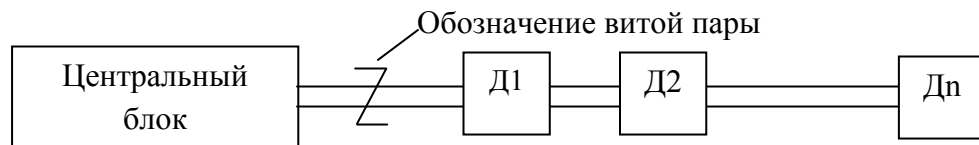


Рис. 7.17. Схема сквозного соединения датчиков

**Шинное соединение (интеллектуальное).** Срабатывание — запись информации по адресу. Наиболее часто используемые соединения: 2- и 4-проводные (рис. 7.18). Если датчики близко расположены друг к другу, то лучше использовать параллельный интерфейс. Современное решение вопроса — прокладка оптоволоконного кабеля.

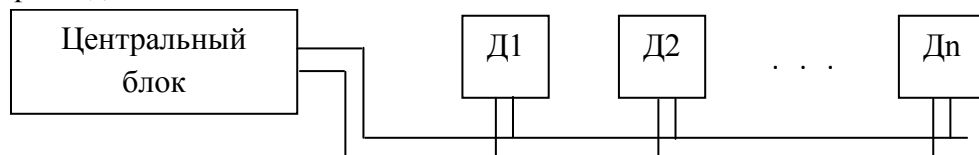


Рис. 7.18. Схема шинного соединения датчиков

**Звезда.** Применяется для определенных типов датчиков. Такие датчики не имеют своего адреса (например, терморезистивные). При большом количестве датчиков затрачиваются большие ресурсы (рис. 7.19).

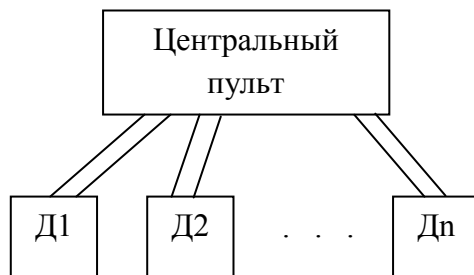


Рис. 7.19. Схема соединения датчиков типа «звезда»

## 7.11. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДАТЧИКОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Перечислим основные перспективные направления развития датчиков и измерительных устройств:

- модульное исполнение, в котором чувствительные преобразователи совмещены с цифровыми преобразователями; микроконтроллерное управление;
- измерительные преобразователи выполняются по 2-проводной схеме включения, в том числе датчики, которые получили питание от источника сигнала;
- нормально-пассивные измерительные преобразователи, которые работают по запросу, как бы находятся в «спящем» режиме и экономят ресурсы;
- электронно-оптические измерительные преобразователи, не требующие питания в точке измерения (за исключением агрессивной среды, в которую нельзя подвести питание), на основе волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

## 8. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Современный подход к организации систем передачи данных (СПД) предполагает использование магистральных каналов связи с уплотнением и адресацией. Информация поступает с объекта управления по параллельной многоканальной системе, включающей измерительные преобразователи (ИП), преобразователи сигнал/код (ПрСК) (рис. 8.1).

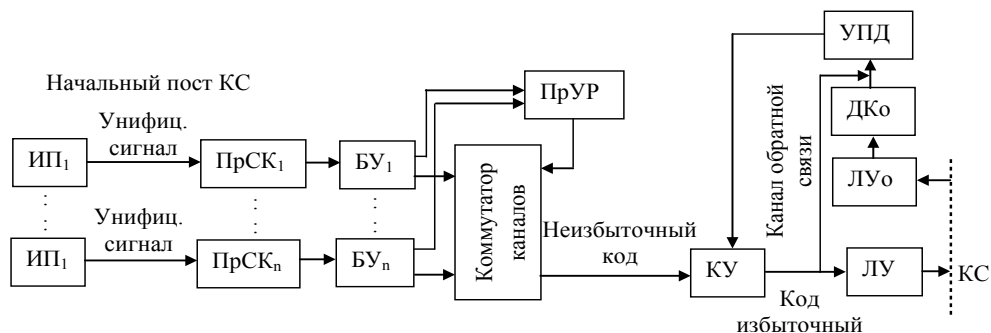


Рис. 8.1. Функциональная схема системы передачи данных для разнесенных объектов (пост канала связи): ИП — измерительный преобразователь; ПрСК — преобразователь «сигнал-код» (первичный преобразователь); БУ — буферное устройство, хранит информацию, пока она не будет считана коммутатором каналов; ПрУР — программное распределительное устройство для управления БУ и коммутатором каналов КК; КУ — кодирующее устройство, добавляет избыточное кодирование; ЛУ — линейное устройство; ЛУо — ЛУ обратного канала связи; ДКо — декодер обратного канала связи; УПД — устройство проверки, определяющее достоверность информации

Задача СПД заключается в необходимом форматировании поступающей информации для дальнейшей передачи в общий канал связи КС. Преобразования информации в СПД требуют времени и вычислительных ресурсов, поэтому необходимо буферное устройство БУ для временного хранения информации. Собственно преобразование в последовательный поток данных осуществляется коммутатором каналов КК. Кодирующее устройство КУ обеспечивает формирование битов служебного и избыточного кода по протоколу передачи канала связи. Современные протоколы оперируют пакетами



тами данных. Каждый пакет содержит заголовок, данные и окончание. Заголовок содержит адресную часть, а окончание формируется с избыточным кодом для возможности проверки качества передачи. Протоколы предусматривают передачу коротких служебных пакетов для подтверждения передачи. Таким образом, СПД получает информацию о состоянии канала связи и может корректировать или повторять передачу пакетов. Для этого используется цепочка устройств обратной связи ЛУ<sub>о</sub> — ДК<sub>о</sub> — УПД.

## 9. ЛИНИИ СВЯЗИ

---

**Л**иния связи состоит из физической среды, по которой передаются электрические информационные сигналы, аппаратуры передачи данных и промежуточной аппаратуры. Синонимом термина *линия связи (line)* является термин *канал связи (channel)*.

*Физическая среда передачи данных (medium)* может представлять собой кабель, то есть набор проводов, изоляционных и защитных оболочек и соединительных разъемов, а также земную атмосферу или космическое пространство, через которые распространяются электромагнитные волны.

В зависимости от среды передачи данных линии связи разделяются:

- на проводные (воздушные);
- кабельные (медные и волоконно-оптические);
- радиоканалы наземной и спутниковой связи.

**Проводные (воздушные) линии связи** представляют собой провода без каких-либо изолирующих или экранирующих оплеток, проложенные между столбами и висящие в воздухе. По таким линиям связи традиционно передаются телефонные или телеграфные сигналы, но при отсутствии других возможностей эти линии используются и для передачи компьютерных данных. Скоростные качества и помехозащищенность этих линий оставляют желать много лучшего. Сегодня проводные линии связи быстро вытесняются кабельными.

**Кабельные линии** представляют собой достаточно сложную конструкцию. Кабель состоит из проводников, заключенных в несколько слоев изоляции: электрической, электромагнитной, механической, а также, возможно, климатической. Кроме того, кабель может быть оснащен разъемами, позволяющими быстро выполнять присоединение к нему различного оборудования. В компьютерных сетях применяются три основных типа кабеля: кабели на основе скрученных пар медных проводов, коаксиальные кабели с медной жилой, а также волоконно-оптические кабели.

Скрученная пара проводов называется *витой парой (twisted pair)*. Витая пара существует в экранированном варианте (*Shielded Twistedpair, STP*), когда пара медных проводов обертывается в изоляционный экран, и неэкранированном (*Unshielded Twistedpair, UTP*), когда изоляционная оберт-

ка отсутствует. Скручивание проводов снижает влияние внешних помех на полезные сигналы, передаваемые по кабелю. *Коаксиальный кабель (coaxial)* имеет несимметричную конструкцию и состоит из внутренней медной жилы и оплетки, отделенной от жилы слоем изоляции. Существует несколько типов коаксиального кабеля, отличающихся характеристиками и областями применения, — для локальных сетей, для глобальных сетей, для кабельного телевидения и т. п. *Волоконно-оптический кабель (optical fiber)* состоит из тонких (5–60 микрон) волокон, по которым распространяются световые сигналы. Это наиболее качественный тип кабеля — он обеспечивает передачу данных с очень высокой скоростью (до 10 Гбит/с и выше) и к тому же лучше других типов передающей среды обеспечивает защиту данных от внешних помех.

**Радиоканалы наземной и спутниковой связи** образуются с помощью передатчика и приемника радиоволн. Существует большое количество различных типов радиоканалов, отличающихся как используемым частотным диапазоном, так и дальностью канала. Диапазоны коротких, средних и длинных волн (КВ, СВ и ДВ), называемые также диапазонами амплитудной модуляции (Amplitude Modulation, AM) по типу используемого в них метода модуляции сигнала, обеспечивают дальнюю связь, но при невысокой скорости передачи данных. Более скоростными являются каналы, работающие на диапазонах ультракоротких волн (УКВ), для которых характерна частотная модуляция (Frequency Modulation, FM), а также диапазонах сверхвысоких частот (СВЧ или microwaves). В диапазоне СВЧ (свыше 4 ГГц) сигналы уже не отражаются ионосферой Земли, и для устойчивой связи требуется наличие прямой видимости между передатчиком и приемником. Поэтому такие частоты используют либо спутниковые каналы, либо радиорелейные каналы, где это условие выполняется.

В компьютерных сетях сегодня применяются практически все описанные типы физических сред передачи данных, но наиболее перспективными являются волоконно-оптические. На них сегодня строятся как магистрали крупных территориальных сетей, так и высокоскоростные линии связи локальных сетей. Популярной средой является также витая пара, которая характеризуется отличным соотношением качества к стоимости, а также простотой монтажа. С помощью витой пары обычно подключают конечных абонентов сетей на расстояниях до 100 метров от концентратора.

В локальных сетях промежуточная аппаратура может совсем не использоваться, если протяженность физической среды — кабелей или радиоэфира — позволяет одному сетевому адаптеру принимать сигналы непосредственно от другого сетевого адаптера, без промежуточного усиления. В противном случае применяются устройства типа повторителей и концентраторов.

Промежуточная аппаратура канала связи прозрачна для пользователя, он ее не замечает и не учитывает в своей работе. Для него важно только

качество полученного канала, влияющее на скорость передачи дискретных данных. В действительности же промежуточная аппаратура образует сложную сеть, которую называют *первичной сетью*, так как сама по себе она никаких высокоуровневых служб (например, файловой или передачи голоса) не поддерживает, а только служит основой для построения компьютерных, телефонных или иных сетей.

В *цифровых линиях* связи передаваемые сигналы имеют конечное число состояний. Как правило, элементарный сигнал, то есть сигнал, передаваемый за один такт работы передающей аппаратуры, имеет два или три состояния, которые передаются в линиях связи импульсами прямоугольной формы. С помощью таких сигналов передаются как компьютерные данные, так и оцифрованные речь и изображение. В цифровых каналах связи используется промежуточная аппаратура, которая улучшает форму импульсов и обеспечивает их ресинхронизацию, то есть восстанавливает период их следования. Промежуточная аппаратура образования высокоскоростных цифровых каналов (мультиплексоры, демультиплексоры, коммутаторы) работает по принципу временного мультиплексирования каналов (Time Division Multiplexing, TDM), когда каждому низкоскоростному каналу выделяется определенная доля времени (тайм-слот или квант) высокоскоростного канала.

Аппаратура передачи дискретных компьютерных данных по аналоговым и цифровым линиям связи существенно отличается, так как в первом случае линия связи предназначена для передачи сигналов произвольной формы и не предъявляет никаких требований к способу представления единиц и нулей аппаратурой передачи данных, а во втором — все параметры передаваемых линией импульсов стандартизованы. Другими словами, на цифровых линиях связи протокол физического уровня определен, а на аналоговых линиях — нет.

Основные характеристики линий связи:

- амплитудно-частотная характеристика;
- полоса пропускания;
- затухание;
- помехоустойчивость;
- перекрестные наводки на ближнем конце линии;
- пропускная способность;
- достоверность передачи данных;
- удельная стоимость.

Разработчика вычислительной сети в первую очередь интересуют пропускная способность и достоверность передачи данных, поскольку эти характеристики прямо влияют на производительность и надежность создаваемой сети. Пропускная способность и достоверность — это характеристики как линии связи, так и способа передачи данных. Поэтому если способ

передачи (протокол) уже определен, то известны и эти характеристики. Например, пропускная способность цифровой линии всегда известна, так как на ней определен протокол физического уровня, который задает битовую скорость передачи данных — 64 Кбит/с, 2 Мбит/с и т. п.

Однако нельзя говорить о пропускной способности линии связи до того, как для нее определен протокол физического уровня. Именно в таких случаях, когда только предстоит определить, какой из множества существующих протоколов можно использовать на данной линии, очень важными являются остальные характеристики линии, такие как полоса пропускания, перекрестные наводки, помехоустойчивость и др.

Передаваемые сигналы имеют целый спектр гармонических составляющих. По этой причине искажение передающим каналом синусоиды какой-либо частоты приводит в конечном счете к искажению передаваемого сигнала любой формы, особенно если синусоиды различных частот искажаются неодинаково. При передаче импульсных сигналов, характерных для компьютерных сетей, искажаются низкочастотные и высокочастотные гармоники, в результате фронты импульсов теряют свою прямоугольную форму. Вследствие этого на приемном конце линии сигналы могут плохо распознаваться.

Линия связи искажает передаваемые сигналы из-за того, что ее физические параметры отличаются от идеальных. Так, например, медные провода всегда представляют собой некоторую распределенную по длине комбинацию активного сопротивления, емкостной и индуктивной нагрузки. В результате для синусоид различных частот линия будет обладать различным полным сопротивлением, а значит, и передаваться они будут по-разному. Волоконно-оптический кабель также имеет отклонения, мешающие идеальному распространению света. Если линия связи включает промежуточную аппаратуру, то она также может вносить дополнительные искажения, так как невозможно создать устройства, которые бы одинаково хорошо передавали весь спектр синусоид — от нуля до бесконечности.

Кроме искажений сигналов, вносимых внутренними физическими параметрами линии связи, существуют и внешние помехи, которые вносят свой вклад в искажение формы сигналов на выходе линии. Эти помехи создают различные электрические двигатели, электронные устройства, атмосферные явления и т. д. Несмотря на защитные меры, предпринимаемые разработчиками кабелей и усилительно-коммутирующей аппаратуры, полностью компенсировать влияние внешних помех не удастся. Поэтому сигналы на выходе линии связи обычно имеют сложную форму, по которой иногда трудно понять, какая дискретная информация была подана на вход линии.

Степень искажения синусоидальных сигналов линиями связи оценивается с помощью таких характеристик, как амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание на определенной частоте.

*Амплитудно-частотная характеристика* показывает, как затухает амплитуда синусоиды на выходе линии связи по сравнению с амплитудой на ее входе для всех возможных частот передаваемого сигнала. Вместо амплитуды в этой характеристике часто используют также такой параметр сигнала, как его мощность.

На практике вместо амплитудно-частотной характеристики применяют упрощенные характеристики — полоса пропускания и затухание.

*Полоса пропускания (bandwidth)* — это непрерывный диапазон частот, для которого отношение амплитуды выходного сигнала к входному превышает некоторый заранее заданный предел, обычно 0,5. Таким образом, полоса пропускания определяет диапазон частот синусоидального сигнала, при которых этот сигнал передается по линии связи без значительных искажений. Знание полосы пропускания позволяет получить с некоторой степенью приближения тот же результат, что и знание амплитудно-частотной характеристики. Как мы увидим ниже, *ширина* полосы пропускания в наибольшей степени влияет на максимально возможную скорость передачи информации по линии связи. Именно этот факт нашел отражение в английском эквиваленте рассматриваемого термина (width — ширина).

*Затухание (attenuation)* определяется как относительное уменьшение амплитуды или мощности сигнала при передаче по линии сигнала определенной частоты. Таким образом, затухание представляет собой одну точку из амплитудно-частотной характеристики линии. Часто при эксплуатации линии заранее известна основная частота передаваемого сигнала, то есть та частота, гармоника которой имеет наибольшую амплитуду и мощность. Поэтому достаточно знать затухание на этой частоте, чтобы приблизительно оценить искажения передаваемых по линии сигналов. Более точные оценки возможны при знании затухания на нескольких частотах, соответствующих нескольким основным гармоникам передаваемого сигнала.

Затухание  $A$  обычно измеряется в децибелах (дБ, decibel — dB).

Поскольку мощность выходного сигнала кабеля без промежуточных усилителей всегда меньше, чем мощность входного сигнала, затухание кабеля всегда является отрицательной величиной.

Например, кабель на витой паре категории 5 характеризуется затуханием не ниже  $-23,6$  дБ для частоты 100 МГц при длине кабеля 100 м. Частота 100 МГц выбрана потому, что кабель этой категории предназначен для высокоскоростной передачи данных, сигналы которых имеют значимые гармоники с частотой примерно 100 МГц. Кабель категории 3 предназначен для низкоскоростной передачи данных, поэтому для него определяется затухание на частоте 10 МГц (не ниже  $-11,5$  дБ). Часто оперируют с абсолютными значениями затухания, без указания знака.

*Абсолютный уровень мощности*, например уровень мощности передатчика, также измеряется в децибелах.

Таким образом, амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание являются универсальными характеристиками, и их знание позволяет сделать вывод о том, как через линию связи будут передаваться сигналы любой формы. Полоса пропускания зависит от типа линии и ее протяженности.

*Пропускная способность (throughput)* линии характеризует максимально возможную скорость передачи данных по линии связи. Пропускная способность измеряется в битах в секунду (бит/с), а также в производных единицах, таких как килобит в секунду (Кбит/с), мегабит в секунду (Мбит/с), гигабит в секунду (Гбит/с) и т. д.

Пропускная способность линий связи и коммуникационного сетевого оборудования традиционно измеряется в битах в секунду, а не в байтах в секунду. Это связано с тем, что данные в сетях передаются последовательно, то есть побитно, а не параллельно, байтами, как это происходит между устройствами внутри компьютера.

Пропускная способность линии связи зависит не только от ее характеристик, таких как, например, амплитудно-частотная характеристика, но и от спектра передаваемых сигналов. Если значимые гармоники сигнала (то есть те гармоники, амплитуды которых вносят основной вклад в результирующий сигнал) попадают в полосу пропускания линии, то такой сигнал будет хорошо передаваться данной линией связи и приемник сможет правильно распознать информацию, отправленную по линии передатчиком. Если же значимые гармоники выходят за границы полосы пропускания линии связи, то сигнал будет значительно искажаться, приемник будет ошибаться при распознавании информации, а значит, информация не сможет передаваться с заданной пропускной способностью.

Выбор способа представления дискретной информации в виде сигналов, подаваемых на линию связи, называется *физическим* или *линейным кодированием*. От выбранного способа кодирования зависит спектр сигналов и соответственно пропускная способность линии. Таким образом, для одного способа кодирования линия может обладать одной пропускной способностью, а для другого — другой. Например, витая пара категории 3 может передавать данные с пропускной способностью 10 Мбит/с при способе кодирования стандарта физического уровня 10Base-T и 33 Мбит/с при способе кодирования стандарта 100Base-T4.

Количество изменений информационного параметра несущего периодического сигнала в секунду измеряется в *бодах (baud)*. Период времени между соседними изменениями информационного сигнала называется тактом работы передатчика.

Пропускная способность линии в битах в секунду в общем случае не совпадает с числом бод. Она может быть как выше, так и ниже числа бод, и это соотношение зависит от способа кодирования.

Если сигнал имеет более двух различных состояний, то пропускная способность в битах в секунду будет выше, чем число бод. Например, если информационными параметрами являются фаза и амплитуда синусоиды, причем различаются четыре состояния фазы в 0, 90, 180 и 270 градусов и два значения амплитуды сигнала, то информационный сигнал может иметь восемь различных состояний. В этом случае модем, работающий со скоростью 2400 бод (с тактовой частотой 2400 Гц), передает информацию со скоростью 7200 бит/с, так как при одном изменении сигнала передается 3 бита информации.

На пропускную способность линии оказывает влияние не только физическое, но и логическое кодирование. *Логическое кодирование* выполняется до физического кодирования и подразумевает замену бит исходной информации новой последовательностью бит, несущей ту же информацию, но обладающей, кроме этого, дополнительными свойствами, например возможностью для приемной стороны обнаруживать ошибки в принятых данных. Сопровождение каждого байта исходной информации одним битом четности — это пример очень часто применяемого способа логического кодирования при передаче данных с помощью модемов. Другим примером логического кодирования может служить шифрация данных, обеспечивающая их конфиденциальность при передаче через общественные каналы связи. При логическом кодировании чаще всего исходная последовательность бит заменяется более длинной последовательностью, поэтому пропускная способность канала по отношению к полезной информации при этом уменьшается.

*Помехоустойчивость линии* определяет ее способность уменьшать уровень помех, создаваемых во внешней среде, на внутренних проводниках. Помехоустойчивость линии зависит от типа используемой физической среды, а также от экранирующих и подавляющих помехи средств самой линии. Наименее помехоустойчивыми являются радиолинии, хорошей устойчивостью обладают кабельные линии и отличной — волоконно-оптические линии, малочувствительные ко внешнему электромагнитному излучению. Обычно для уменьшения помех, появляющихся из-за внешних электромагнитных полей, проводники экранируют и/или скручивают.

Системы передачи данных подразделяются по различным признакам.

1. По роду соединения с источником информации:

- коммутируемые — соединение с источником информации через специальное оборудование автоматических телефонных станций сети общего пользования (в т. ч. включая сотовые каналы связи);
- некоммутируемые — каналы подключены постоянно для выделенных абонентов.

2. По способу передачи информации:

- симплексные (передают информацию в одном направлении в один момент времени);
- полудуплексные (передают информацию в оба направления, но в разные моменты времени);



– дуплексные (передают информацию одновременно в оба направления).

### 3. По скорости:

- с низкой скоростью (до 300 бод);
- со средней скоростью (300–9600 бод), модемная скорость 28 800 бод;
- с высокой скоростью (более 9 600 бод), применяются специальные витые пары, в основе лежит дифференциальный принцип.

### 4. По способу синхронизации:

- синхронные;
- асинхронные

Синхронная связь предполагает наличие канала синхронизации с частотой  $f_c$ . По этому каналу поступают синхронизирующие импульсы, которые управляют работой всех устройств КС на приемной стороне. Простейший синхронизатор может быть показан на примере D-триггера (рис. 9.1). Биты данных поступают в триггер синхронно с перепадами напряжения частотой  $f_c$  на тактовом входе.

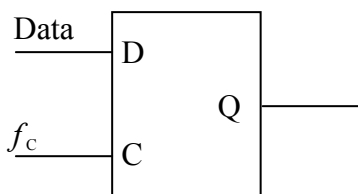


Рис. 9.1. Схема синхронизатора на базе D-триггера

Асинхронная связь (рис. 9.2) — синхронизация заложена в пакет данных и происходит каждый раз заново. В начале посылки существует стартовый импульс, в конце — стоповый. В начале посылки схема обнаруживает стартовый бит и производит сброс внутреннего генератора G. В результате производится синхронизация сигналов генератора G с генератором удаленного передатчика. Очевидно, синхронизация производится только на время передачи пакета и требует совпадения частот передатчика и приемника с такой точностью, чтобы за время передачи пакета рассогласование не превысило  $\frac{1}{2}$  длительности битового интервала. Тактирующие импульсы генератора G используются для заполнения буферного стека и нумерации поступающих битов счетчиком Ст.

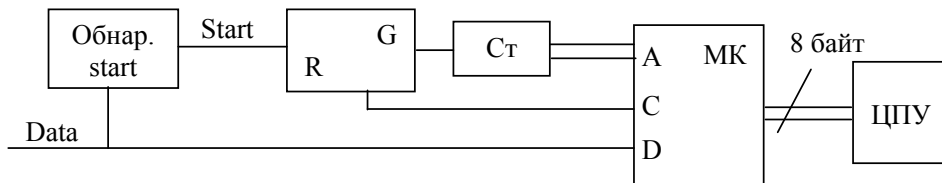


Рис. 9.2. Логическая схема асинхронной связи:

Ст — счётчик; G — генератор; МК — микроконтроллер с буферным стеком

Подобные схемы синхронизации используются в большинстве современных промышленных интерфейсов с последовательной передачей данных, например:

- RS 232;
- RS 485;
- RS 422;
- Modbus (между контроллерами);
- Ethernet (последовательный канал связи).

## 10. ИНТЕРФЕЙСЫ ТСАУ

---

### 10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**И**нтерфейс — это совокупность технических, программных и методических (протоколов, правил, соглашений) средств сопряжения пользователей с устройствами и программами в вычислительной системе, а также устройств с другими устройствами и программами.

Интерфейсы — совокупность унифицированных, аппаратно-программных и конструктивных устройств, необходимых для реализации алгоритмов взаимодействия различных функциональных блоков в автоматизированных системах обработки информации и управления.

Различают:

- интерфейс пользователя — набор методов взаимодействия компьютерной программы и пользователя этой программы;
- программный интерфейс — набор методов для взаимодействия между программами;
- физический интерфейс — способ взаимодействия физических устройств.

В рамках данной главы будут рассмотрены различные физические интерфейсы, широко используемые при построении промышленных сетей связи. При этом будет сделан акцент на стандартах технической и логической реализации промышленных интерфейсов.

Под стандартом «технической», или «физической», реализации понимается совокупность аппаратных средств, используемых для организации физического интерфейса: типы разъемов, среда передачи данных, способ кодирования информации и т. п.

Под «логическими» интерфейсами, или так называемыми шинами связи, понимаются стандартизованные интерфейсы, для которых помимо технической стороны определена также логическая — протокол передачи данных.

Стандартизация определяет следующие составные части интерфейсов:

- устройства приемников (П);
- устройства источников (И);

- устройства контроллеров;
- линии связи;
- протоколы взаимодействия источников и приемников.

Различные шины — с разными протоколами связи — могут использовать один и тот же «физический» интерфейс, т. е. иметь, например, одинаковые разъемы и среду передачи данных.

Далее будут приведены примеры таких стандартов и рассмотрены стандарты «физических» интерфейсов и промышленных шин связи физических устройств.

Различают следующие структуры интерфейсов:

- радиальная;
- магистральная;
- смешанная;
- кольцевая.

**Радиальная.** Каждый И и П связан с центральным контроллером, который называется концентратором, через индивидуальную группу шин с одинаковым составом. Центральный контроллер выполняет функции арбитра, если заявки приходят от нескольких И или П. Система выбора абонентов — схема приоритетов. Точка присоединения кабеля определяет уровень приоритета (часто, но не всегда).

**Магистральная.** Коллективные шины магистральной линии образуют систему, которая подключает все И и П, включая контроллер-арбитр. Пространственное распределение в радиальной структуре заменяется временным распределением.

**Смешанная.** Управление адресацией и идентификацией происходит по отдельным линиям. Применяется на базе радиальной и магистральной структур путем добавления к магистральной структуре специально выделенных линий связи.

**Кольцевая.** Все И и П соединены последовательно друг с другом кольцевой линией связи. Сигналы идут от И к соседнему узлу. Если адрес этого узла не совпадает с заданным И, то сигналы транслируются дальше.

Состав сигналов шины:

- адресные;
- командные;
- информационные;
- управляющие;
- извещающие;
- идентификационные;
- шины питания;
- шины состояния.

Одна из основных задач, решаемая интерфейсной схемой, заключается в согласовании работы разных устройств, обменивающихся данными.

По способу согласования различают интерфейсы:

- синхронные — которые имеют выделенную линию для передачи частоты синхронизации;
- асинхронные — которые не имеют такой линии и работают по принципу выделения кодовой последовательности.

Схема на рис. 10.1 может быть применена как для синхронного, так и для асинхронного времени считывания. На схеме иллюстрируется процесс считывания адреса А с помощью синхронизирующих сигналов OE и CE в буферный регистр RG.

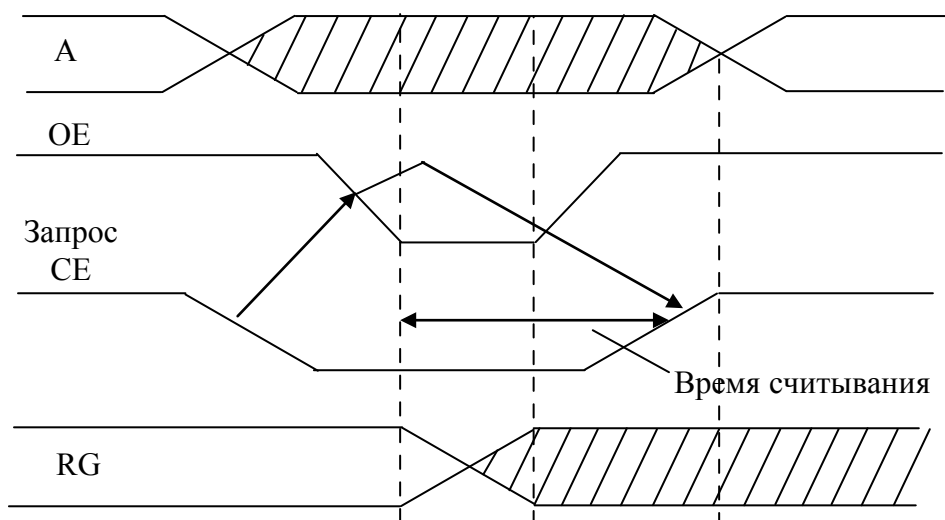


Рис. 10.1. Схема переходных процессов для асинхронного протокола «запрос—ответ»

Информация на входе должна присутствовать более длительное время, чем в регистрах сноса. Это делается для того, чтобы завершить переходные процессы.

Дополнительные возмущающие факторы связаны с помехами, наводками и т. д.

Режимы синхронизации:

- на уровне битов;
- на уровне логики устройств.

Виды синхронизации:

- на уровне пакетов (общая синхронизация);
- на уровне битов (местная синхронизация).

## 10.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕЙСЫ

### 10.2.1. Интерфейс RS-232

RS-232 — это название стандарта (RS — recommended standard — рекомендованный стандарт, 232 — его номер), описывающего интерфейс для соединения компьютера и устройства передачи данных.

RS-232 — интерфейс передачи информации между двумя устройствами на расстоянии до 30 метров. Информация передается по проводам с уровнями сигналов, отличающимися от стандартных 5 В, для обеспечения большей устойчивости к помехам. Асинхронная передача данных осуществляется с установленной скоростью при синхронизации уровнем сигнала стартового импульса.

В настоящее время действует редакция стандарта, принятая в 1991 году Ассоциацией электронной и телекоммуникационной промышленности, под названием EIA/TIA-232-E.

Интерфейс RS-232 обеспечивает соединение двух устройств, одно из которых является оборудованием передачи данных, а второе — конечным оборудованием.

Можно сказать, что RS-232 служит для связи компьютера с различными протоколами, поскольку практически во всех промышленных интерфейсах предусмотрены специальные «переходники» на RS-232. Сами датчики редко имеют выходной интерфейс в виде RS-232 (рис. 10.2).

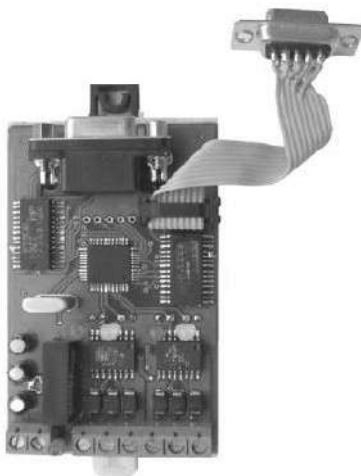


Рис. 10.2. Преобразователь RS485/RS232

#### Протоколы и разъемы

Интерфейс RS-232 имеет хорошо знакомый всем разъем DB9, присутствующий на всех компьютерах (так называемый COM-порт) (рис. 10.3).



Рис. 10.3. Разъем DB9

Для передачи данных предназначены цепи RD и TD. Остальные цепи предназначены для индикации состояния устройств (DTR, DSR), управления передачей (RTS, CTS) и индикации состояния линии (CD, RI).

Полный набор цепей используется только для подключения к ПЭВМ внешнего модема. В остальных случаях, например при подключении к ПЭВМ промышленного контроллера, используется ограниченный набор цепей, зависящий от аппаратной и программной реализации стыка в контроллере.

Для соединения многих устройств достаточно минимального набора цепей интерфейса RS-232: RD, TD и Signal Ground. Вот, например, схема кабеля для соединения ПЭВМ и контроллера ВАРИКОНТ на соединителях DB9 (рис. 10.4).

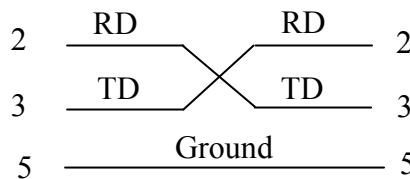


Рис. 10.4. Схема соединения ПЭВМ и ВАРИКОНТ

Остальные цепи интерфейса в данном подключении не используются (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Описание сигналов DB9

Номер контакта	Название цепи	Название сигнала
1	CD	Наличие несущей частоты
2	RD	Принимаемые данные
3	TD	Передаваемые данные
4	DTR	Готовность компьютера
5	GND	Общий
6	DSR	Готовность передатчика
7	RTS	Запрос на передачу
8	CTS	Подтверждение готовности для передачи
9	RI	Наличие сигнала вызова

Все сигналы в интерфейсе потенциальные, с номинальными уровнями +12 В и –12 В относительно общего провода (Signal Ground). Логической «1» соответствует уровень –12 В, а «0» — +12 В (рис. 10.5).

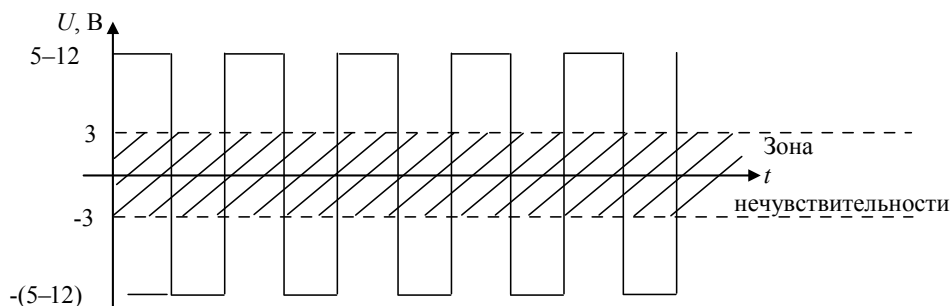


Рис. 10.5. Физическое кодирование сигналов RS-232

Схемы обработки сигнала имеют двусторонний порог.

В каждом канале связи существует уровень логического представления сигнала (0 или 1) и уровень физического представления сигнала (меньше нуля или больше нуля соответственно).

В отсутствие передачи данных линия находится в состоянии логической единицы. Скорость передачи данных стандартом не нормируется, но обычно выбирают из ряда 110, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 бит в секунду. В основном используется асинхронный режим работы, при котором данные последовательно передаются *фреймами*, каждый из которых состоит из *стартового бита*, *битов данных*, *бита контроля четности* (может отсутствовать) и *стопового бита*. Биты байта данных передаются «задом наперед», начиная с младшего бита (рис. 10.6).

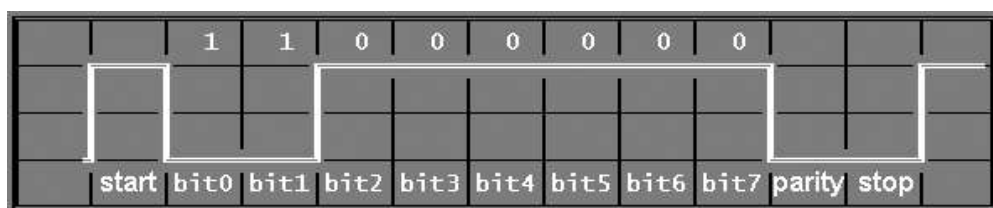


Рис. 10.6. Биты данных

**Скорость и дальность.** Стандарт определяет максимальную длину кабеля примерно в 15 м при скорости 9600 бит/с. На практике устойчивая работа может быть достигнута и при большей длине кабеля. Утверждают, что можно удвоить указанную цифру при использовании неэкранированного кабеля и упятерить ее для экранированного кабеля, а при понижении скорости вдвое предельная длина может быть увеличена примерно вдвое. Тем не менее нельзя ручаться за это утверждение вследствие различного уровня внешних электромагнитных помех в каждом конкретном случае.



Для RS-232 рекомендуется использовать кабели на основе витой пары, где каждый из сигнальных проводов свит с общим проводом. Например, для этой цели хорошо подходит кабель для прокладки локальной сети Ethernet на неэкранированных витых парах, а лучше — на экранированных.

На сегодняшний день интерфейс RS-232 не имеет особых перспектив развития и все больше вытесняется интерфейсом USB.

### 10.2.2. Интерфейс RS-485

RS-485 — стандарт, впервые принятый Ассоциацией электронной промышленности (EIA). Сейчас он называется *TIA/EIA-485 Electrical Characteristics of Generators and Receivers for Use in Balanced Digital Multipoint Systems* (Электрические характеристики передатчиков и приемников, используемых в балансных цифровых многоточечных системах).

RS-485 является протоколом физического уровня для интерфейсов ModBus и Profibus. Он широко используется при создании АСУ ТП, и многие датчики имеют выходной сигнал, соответствующий этому протоколу.

RS-485 обеспечивает обмен данными между несколькими устройствами по одной двухпроводной линии связи в полудуплексном режиме: по одному проводу идет оригинал сообщения (рис. 10.7), а по другому — его инверсия (вместо «1» — «0», и наоборот).

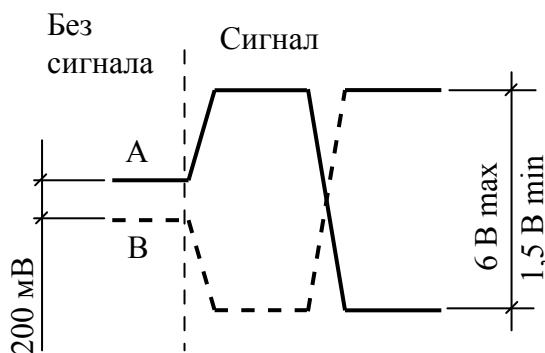


Рис. 10.7. Сигналы по протоколу RS-485

**Скорость и дальность.** RS-485 обеспечивает передачу данных со скоростью до 10 Мбит/с. Максимальная дальность зависит от скорости: при скорости 10 Мбит/с максимальная длина линии — 120 м, при скорости 100 кбит/с — 1200 м.

**Количество подключаемых устройств.** Количество устройств, подключаемых к одной линии интерфейса, зависит от типа используемых передатчиков. Один передатчик рассчитан на управление 32 стандартными приемниками. Выпускаются приемники с входным сопротивлением 1/2, 1/4, 1/8 от стандартного значения. При использовании таких приемников общее число устройств может быть увеличено соответственно до 64, 128 или 256.

**Протоколы и разъемы.** Стандарт не нормирует формат информационных кадров и протокол обмена. Наиболее часто для передачи данных используются стартовый и стоповый биты, если нужно — бит паритета.

Протоколы обмена в большинстве систем работают по принципу «ведущий—ведомый». Одно устройство на магистрали является ведущим (master) и инициирует обмен посылкой запросов подчиненным устройствам (slave), которые различаются логическими адресами. Тип соединителей и распайка также не оговариваются стандартом. Встречаются соединители DB9, клеммные соединители и т. д. Примерный тип соединений показан на рис. 10.8.

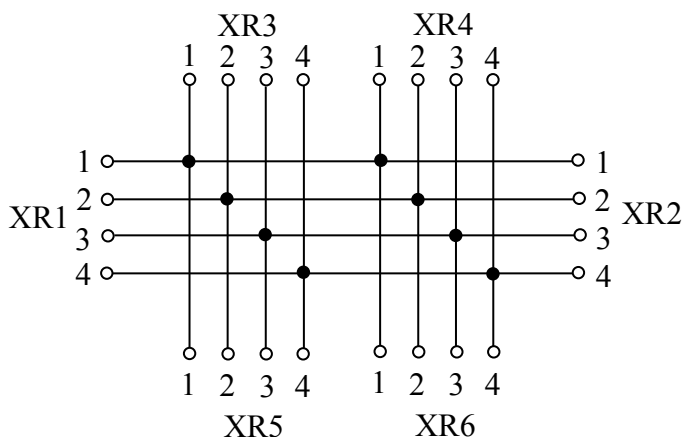


Рис. 10.8. Схема распайки соединений в блоке коммутации для последовательных линий связи

В случае необходимости подсоединения нескольких устройств можно использовать специальное присоединительно-согласующее устройство — разветвитель (рис. 10.9).

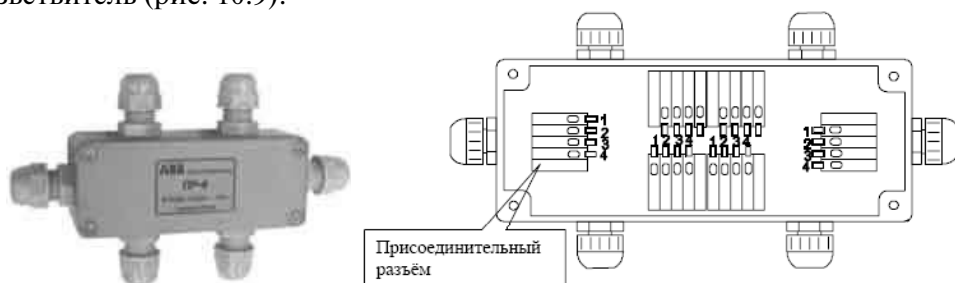


Рис. 10.9. Общий вид и монтажная схема разветвителя

**Подключение.** На рис. 10.10 изображена локальная сеть на основе интерфейса RS-485, объединяющая несколько приемопередатчиков. Обычно при построении сети на RS-485 используется три провода кабеля витой пары: провода А, В и общий для синхронизации сигналов.

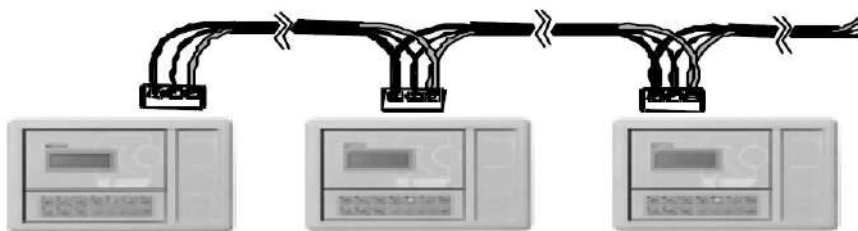


Рис. 10.10. Пример сети с интерфейсом RS485 с разъемным соединением

### Общие рекомендации построения сети на RS-485:

- лучшей средой передачи сигнала является кабель на основе *специальной витой пары* (хотя широко используется и витая пара категории 5 для прокладки Ethernet);
- концы кабеля должны быть заглушены *терминальными резисторами* (обычно 120 Ом);
- сеть должна быть проложена по топологии *шины*;
- устройства следует подключать к кабелю проводами *минимальной длины*.

Витая пара является оптимальным решением для прокладки сети на основе интерфейса RS-485, поскольку обладает наименьшим паразитным излучением сигнала и хорошо защищена от наводок. В условиях повышенных внешних помех применяют кабели с экранированной витой парой, при этом экран кабеля соединяют с защитной «землей» устройства.

На рис. 10.11 изображена локальная сеть на основе интерфейса RS-485, объединяющая несколько приемопередатчиков.

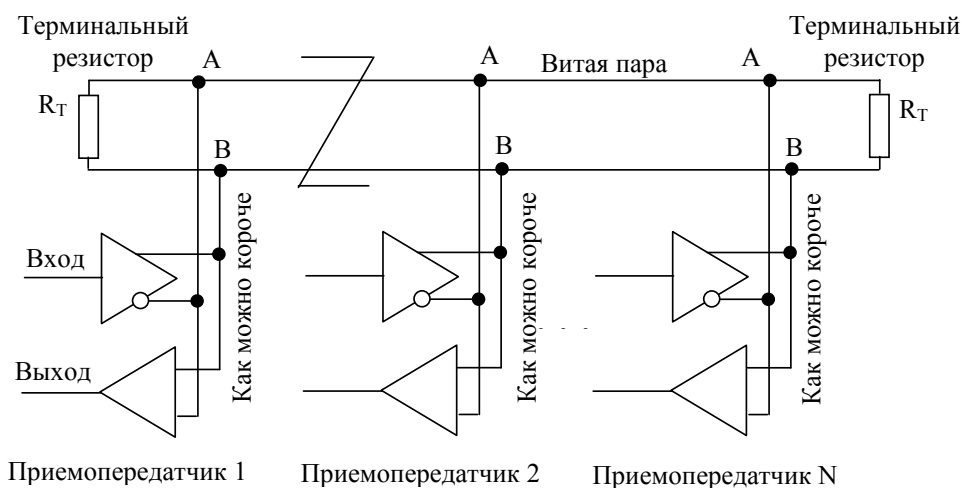


Рис. 10.11. Локальная сеть на основе интерфейса RS-485

Терминальные резисторы обеспечивают согласование «открытого» конца кабеля с остальной линией, устраняя отражение сигнала. Номинальное сопротивление резисторов соответствует волновому сопротивлению кабеля. Например, широко распространённый кабель UTP-5, используемый для прокладки Ethernet, имеет импеданс 100 Ом. Специальные кабели для RS-485 марки Belden 9841–9844 – 120 Ом. Для другого типа кабеля может потребоваться другой номинал.

### 10.2.3. CAN-интерфейс

CAN — последовательный интерфейс, обеспечивающий увязку в сеть «интеллектуальных» устройств ввода/вывода, датчиков и исполнительных устройств и характеризующийся протоколом, обеспечивающим:

- возможность нахождения на магистрали нескольких ведущих устройств;
- передачу данных в реальном масштабе времени;
- коррекцию ошибок и высокую помехоустойчивость.

Система CAN включает большое количество микросхем, обеспечивающих работу подключенных к магистрали устройств, разработку которых начинала фирма BOSCH для использования в автомобилях, и в настоящее время широко используемых в автоматизации промышленности. Именно высокая помехоустойчивость и коррекция ошибок являются отличительной особенностью CAN-интерфейса. Характеристики этого интерфейса даны в табл. 10.2. Максимальная скорость передачи информации этого интерфейса зависит от расстояния (табл. 10.3).

Таблица 10.2

Характеристики CAN

Параметры	Значения
Стандарт	ISO 11898
Скорость передачи	1 Мбит/с (максимум)
Расстояние передачи	1000 м (максимум)
Характер сигнала	Дифференциальное напряжение
Количество передатчиков	64
Количество приемников	64
Схема соединения	Полудуплекс, многоточечная

CAN содержит пятиступенчатый механизм обнаружения ошибок:

- циклический контроль по избыточности (CRC);
- контроль передаваемого поля битов;

- контроль сигнала «Подтверждение Приема»;
- текущий контроль логического уровня битов;
- контроль заполнения битов.

При этом общая вероятность необнаруженной ошибки составляет  $4,7 \cdot 10^{-11}$ .

Таблица 10.3

Зависимость скорости передачи от расстояния

Расстояние, м	Скорость, кбит/с
25	1000
50	800
100	500
250	250
500	125
1000	50
2500	20
5000	10

**Подключение устройств.** Устройства в CAN-системе соединяются по шине, состоящей из трёх проводов (двух сигнальных и одного общего). Подсоединение устройств в CAN-системе подобно подсоединению, показанному на рис. 10.11.

Максимальное число абонентов, подключенных к данному интерфейсу, фактически определяется нагрузочной способностью примененных приемопередатчиков. Например, при использовании трансивера фирмы PHILIPS PCA82C250 она равна 110.

Физическая среда передачи данных CAN-интерфейса, характеристики приемопередатчиков, разводка разъемов, свойства кабелей, топология сети не оговариваются CAN-спецификацией BOSCH. Чаще всего физическая шина представляет собой витую пару (экранированную или неэкранированную). Плоская пара (телефонный тип кабеля) тоже работает хорошо, но более чувствительна к внешним источникам шума.

Для организации CAN-шины возможно использовать такие нестандартные решения, как применение оптоволоконного или беспроводного соединения. Передача питания через CAN-интерфейс не противоречит CAN-стандарту, но реально не используется из-за высокой стоимости передатчиков.

**Протоколы и разъемы.** Для соединения отдельных узлов с CAN-шиной используется девятиконтактный разъем DB9 (рис. 10.12). Описание его сигналов приведено в табл. 10.4.

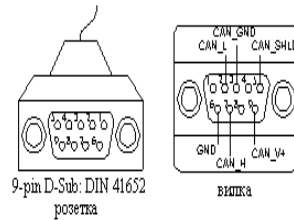


Рис. 10.12. Девятиконтактный разъем DB9

Таблица 10.4

Описание сигналов

Контакт	Описание
1	-
2	Низкий уровень
3	Земля
4	-
5	Экран (необязательный)
6	Земля (необязательный)
7	Высокий уровень
8	-
9	Питание (необязательный)

Подсоединение к CAN-шине датчиков, имеющих разъем, отличный от DB9, и построение CAN-сети осуществляется с помощью специальных модулей ввода/вывода I/O-модулей, которые согласуют различные интерфейсы с CAN-шиной.

Сообщения данных, передаваемые из любого узла по CAN-шине, могут содержать 1–8 байт. Каждое сообщение помечено идентификатором, который в сети является уникальным.

Идентификатор является оригинальной системой адресации сообщений CAN-протокола. Он определяет назначение передаваемых данных, их тип и приоритет, но не несет информации об адресе приемника.

Принципы работы с идентификатором:

- более низкому числовому значению идентификатора соответствует более высокое значение приоритета;
- сообщение, имеющее более высокий приоритет, передается раньше сообщения, имеющего более низкий приоритет;

- после сообщения с высоким приоритетом передается сообщение с более низким приоритетом, если во время передачи не появится сообщение с более высоким приоритетом;

- затем передается сообщение с еще более низким приоритетом и т. д.

При передаче другие узлы сети получают сообщение, и каждый из них проверяет идентификатор. Если сообщение имеет отношение к данному узлу, то оно обрабатывается, в противном случае — игнорируется. CAN-контроллер каждого из устройств может обрабатывать одновременно несколько идентификаторов (например, контроллеры SIEMENS и INTEL могут обрабатывать до 15 идентификаторов).

Таким образом, в каждом из устройств можно легко организовать несколько «виртуальных» каналов обмена информацией с различными устройствами, включая каналы одновременного получения сообщений.

Узлы CAN-сети являются равноправными при обмене, и каждый из них в любой момент времени может иметь сообщение, требующее безотлагательной передачи. Вероятность одновременного требования передачи от различных устройств не является чем-то необычным, а случается регулярно. Для разрешения подобного конфликта требуется быстрое действующий механизм распределения очередности передачи сообщений. Для этого в CAN-системе используется неразрушающий поразрядный арбитраж.

Приоритет CAN-сообщения определяется двоичным значением его идентификатора.

Числовое значение каждого идентификатора сообщения назначается в начальной фазе проектирования системы. Идентификатор с самым низким числовым значением имеет самый высокий приоритет.

Передача логического нуля по CAN-шине осуществляется токовой посылкой, а состояние логической единицы определяется по отсутствию тока. В процессе передачи каждый из источников сообщений, который имеет необходимость в передаче, начинает передавать свой идентификатор, одновременно проверяя его на линии. Если в процессе передачи обнаруживается несовпадение (т. е. «лишний» ноль), то передатчик, обнаруживший это несоответствие, прекращает передачу своего идентификатора и переключается на прием. Конфликта на шине при этом нет, т. к. значение бита с уровнем логической единицы фактически не передается, и в результате сообщение с наивысшим приоритетом проходит по шине так, как будто оно единственное. В следующем цикле шины будет передано сообщение с более низким приоритетом и т. д.

Таким образом, достигается максимальная пропускная способность шины и минимальная задержка для «горячих» сообщений.

### 10.2.4. Интерфейс AS

Сеть на AS-интерфейсе (Aktuator Sensor Interface) предназначена для связи устройств автоматизации с датчиками и исполнительными устройствами на самом низком уровне. Особенностью и «визитной карточкой» этого интерфейса является желтый кабель, используемый в качестве единственной шины связи между всеми модулями AS-сети.

Необычность желтого кабеля заключается том, что он:

- состоит всего из двух проводов;
- позволяет легко подключать новые устройства в любом месте следующим образом: лезвия контактов проникают через изоляцию кабеля as<sub>i</sub> и создают надежный контакт с двумя сердечниками, нет необходимости в удалении изоляции;
- одновременно передаёт данные и электропитание, для чего в сеть включаются специальные блоки питания.

#### Подключение устройств

Подключение датчиков к AS-сети осуществляется через специальные блоки ввода/вывода, которые, в свою очередь, «цепляются» на шину прорезанием контактами изоляции (рис. 10.13).

Стоит отметить, что AS<sub>i</sub> может передавать не только дискретные, но и аналоговые сигналы. Распознавание типа сигнала осуществляется автоматически блоком ввода/вывода.



Рис. 10.13. Подключение устройств

Интеграция AS-сети в сеть с протоколом более высокого уровня осуществляется также с помощью блока ввода/вывода, имеющего соответствующие интерфейсы связи с другими шинами.

Кроме уже упомянутых блоков, в состав AS-сети входит также ведущее устройство — master, которое выполняет опрос датчиков и передачу данных на шину более высокого уровня.

Особенности построения сети:

- линия AS-интерфейса устанавливается как обычный кабель: новые цепи могут быть добавлены там, где они требуются, что позволяет создавать сети с различными топологиями;



- максимальная допустимая длина кабеля — 100 м. Она может быть увеличена до 300 м при использовании повторителей;
- никакие экраны или оконечные резисторы не нужны. Схемы подключения могут быть адаптированы к индивидуальным требованиям производства или установки.

К AS-интерфейсу могут быть подсоединены до 31 узла или подчиненных устройства. Подчиненными могут быть, к примеру, модули AS-интерфейса для подключения дискретных или аналоговых датчиков либо датчики со встроенным чипом AS-интерфейса.

Каждый узел имеет 4 информационных бита (например, 4 дискретных выхода). Таким образом, до 4 стандартных дискретных датчиков и/или исполнительных устройств могут быть подключены к одному модулю AS-интерфейса, и появляется возможность связывания до 124 датчиков и 124 исполнительных устройств ( $31 \times 4$  входа и 4 выхода).

**Протокол работы ASi.** AS-интерфейс работает по принципу «ведущий-ведомый» (Master-Slave). При этом в центральном устройстве находится модуль Master. Датчики/исполнительные устройства, подключаемые через линию ASi, управляются устройством Master в качестве ведомых (Slave).

Master осуществляет:

- инициализацию сети;
- идентификацию устройств-узлов;
- ациклическую передачу параметров устройствам в сети;
- диагностику передачи данных и состояния устройств типа Slave;
- передачу сообщений об ошибках в системе управления;
- адресацию замененных устройств Slave.

Модули Master осуществляют циклический опрос всех узлов (Polling), циклическую ретрансляцию данных контроллеру или прием данных от него.

Благодаря тому, что модули Master самостоятельно осуществляют связь с ведомыми устройствами, устройство автоматизации (контроллер) полностью освобождено от функций опроса.

Время цикла опроса составляет менее 5 мс при работе тридцати одного устройства типа Slave.

Пакеты информации от каждого ведомого устройства содержат 4 бита полезной информации. При обнаружении ошибки в переданном пакете Master инициирует повторную передачу пакета.

#### **Техника передачи информации в ASi**

Существенным отличительным признаком интерфейсов AS является использование одного и того же двухпроводного кабеля как для передачи информации, так и для электропитания.

В данном случае используется принцип последовательной передачи на базовой частоте. Информационный сигнал модулирует несущую частоту. Соединительные кабели интерфейсов AS не экранированы, использует-

ся информационный сигнал такой формы, которая обеспечивает понижение рассеиваемого электромагнитного излучения до минимального уровня.

Важными особенностями используемого типа модуляции являются низкая граничная частота и низкий уровень рассеиваемого излучения.

Создаваемые внутри каждого передающего устройства последовательно-цифровых сигналов преобразуются в манчестерский код, а затем трансформируются в исходящий токовый сигнал. В комбинации со встроенным в блок питания ASi модулем отделения данных ток передачи генерирует на передающей линии импульсы напряжения, по форме приближающиеся к  $\sin^2 x$ . Существенный вклад в надежность передачи данных вносят форма сигнала и ток передачи в диапазоне 0–60 мА.

### **Компоненты общей интерфейсной системы AS**

Для построения промышленной низкоуровневой сети на AS-интерфейсе необходимы следующие компоненты:

- интерфейсы типа Master для программируемых контроллеров или ПК;
- специальный профильный кабель;
- монтажные модули для профильного кабеля;
- клеммы для разветвления соединительных линий AS-интерфейсов;
- блок питания AS-интерфейсов для электроснабжения устройств типа Slave;
- исполнительные механизмы и датчики с интегрированной электроникой Slave или без нее;
- программатор адресов для настройки адресов устройств типа Slave.

### **10.2.5. Интерфейс PROFIBUS**

**PROFIBUS (PROcess FieId BUS)** — открытая промышленная шина, прототип которой был разработан компанией Siemens AG для своих промышленных контроллеров SIMATIC. На основе этого прототипа Организация пользователей Profibus разработала международные стандарты, принятые затем некоторыми национальными комитетами по стандартизации. Шина Profibus очень широко распространена в Европе, особенно в машиностроении и управлении промышленным оборудованием. Profibus объединяет технологические и функциональные особенности последовательной связи полевого уровня. Она позволяет объединять разрозненные устройства автоматизации в единую систему на уровне датчиков и приводов (рис. 10.14).

#### **Поддерживаемые стандарты**

Открытость и независимость шины Profibus от производителя гарантирует стандарт EN 50170, все остальное реализовано в соответствии со стандартом DIN19245 (а именно: техника передачи данных, методы доступа, протоколы передачи, сервисные интерфейсы для уровня приложе-

ний, спецификация протоколов, кодирование, коммуникационная модель и т. д.).

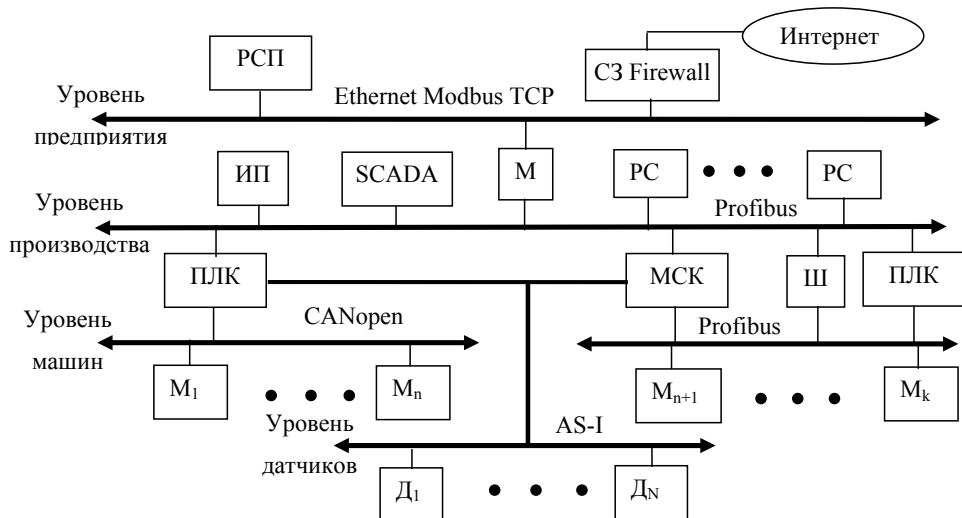


Рис. 10.14. Схема подключения по Profibus: PCП — рабочая станция предприятия; C3 — система защиты; ИП — источник питания; M — маршрутизатор; PC — рабочая станция; ПЛК — программируемый логический контроллер; MCK — межсетевой контроллер; Ш — шлюз; M — машина (устройства ввода/вывода, исполнительные и интеллектуальные устройства и др.); Д — датчики

С помощью Profibus устройства разных производителей могут работать друг с другом без каких-либо специальных интерфейсов. Семейство Profibus состоит из трех совместимых друг с другом версий:

- Profibus DP;
- Profibus PA;
- Profibus FMS.

**PROFIBUS DP** (Decentralized Peripheral — распределенная периферия) — протокол, ориентированный на обеспечение скоростного обмена данными между системами автоматизации (ведущими DP-устройствами) и устройствами распределённого ввода-вывода (ведомыми DP-устройствами). Протокол характеризуется минимальным временем реакции и высокой стойкостью к воздействию внешних электромагнитных полей. Оптимизирован для высокоскоростных и недорогих систем. Эта версия сети была спроектирована специально для связи между автоматизированными системами управления и распределенной периферией. Электрически близка к RS-485, но сетевые карты используют двухпортовую рефлексивную память, что позволяет устройствам обмениваться данными без загрузки процессора-контроллера.

**PROFIBUS PA** (Process Automation — автоматизация процесса) — протокол обмена данными с оборудованием полевого уровня, расположенным в обычных или взрывоопасных зонах. Протокол отвечает требованиям международного стандарта IEC 61158-2. Позволяет подключать датчики и приводы на одну линейную или кольцевую шину.

**PROFIBUS FMS** (Fieldbus Message Specification — спецификация сообщений полевого уровня) — универсальный протокол для решения задач по обмену данными между интеллектуальными сетевыми устройствами (контроллерами, компьютерами/программаторами, системами человеко-машинного интерфейса) на полевом уровне. Некоторый аналог промышленного Ethernet, обычно применяется для высокоскоростной связи между контроллерами и компьютерами верхнего уровня и используемыми диспетчерами. Скорость до 12 Мбит/с.

#### **Физический уровень Profibus**

Физически Profibus может представлять собой:

- электрическую сеть с шинной топологией, использующую экранированную витую пару, соответствующую стандарту RS-485;
- оптическую сеть на основе оптоволоконного кабеля;
- инфракрасную сеть.

Скорость передачи по Profibus-сети может варьироваться от 9,6 Кбит/с до 12 Мбит/с.

#### **Протокол доступа к шине Profibus**

Для всех версий Profibus существует единый протокол доступа к шине. Данный протокол реализует процедуру доступа с помощью маркера (token).

Сеть Profibus состоит из ведущих (master) и ведомых (slave) станций. Ведущая станция может контролировать шину, т. е. может передавать сообщения (без удалённых запросов), когда она имеет право на это (т. е. когда у неё есть маркер). Ведомая станция может лишь распознавать полученные сообщения или передавать данные после соответствующего запроса.

Маркер циркулирует в логическом кольце, состоящем из ведущих устройств. Если сеть состоит только из одного ведущего, то маркер не передаётся (в таком случае в чистом виде реализуется система master-slave). Сеть в минимальной конфигурации может состоять либо из двух ведущих, либо из одного ведущего и одного ведомого устройства.

## 11. УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

**Ц**ентральной частью САУ являются устройства, которые преобразуют, обрабатывают и хранят информацию — анализаторы сигналов, функциональные преобразователи, устройства памяти, логические устройства, автоматические регуляторы, задатчики, управляющие вычислительные машины (УВМ), управляющие вычислительные комплексы (УВК), микропроцессорные устройства (МПУ), микропроцессорные системы (МПС).

### Микропроцессорные устройства

Микропроцессорные устройства и системы ориентируются на класс объектов или задач. Для МПУ характерны типизация и унификация. Различаются в основном мощностью вычислительного блока, количеством и разнообразием внешних связей и интерфейсов:

- функции контроля, регулирования, управления с числом каналов до 256 — функции сосредоточены в одном типовом МПУ, обладающем функциональной полнотой, автономностью и конструктивной завершенностью — моноблок;
- функции контроля, регулирования, управления с числом каналов более 256 — функции распределены на несколько контроллеров МПС — модульная система включает несколько МПУ.

На рис. 11.1 показана типовая структура центральной части МПУ. На рис. 11.2 показана информационная структура МПС.

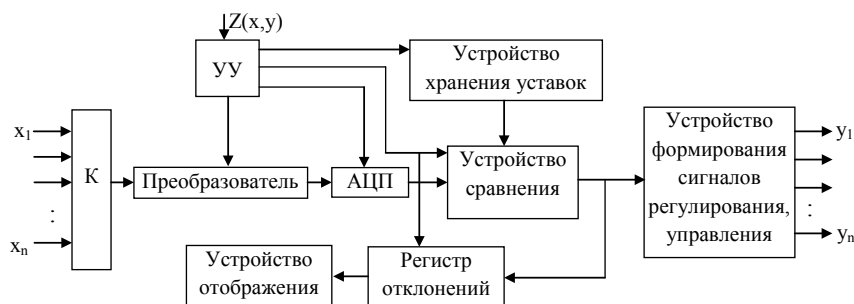


Рис. 11.1. Типовая структура центральной части МПУ для автоматизации: УУ — устройство управления; АЦП — аналого-цифровой преобразователь;  $x_1$ — $x_n$  — входные величины;  $y_1$ — $y_n$  — выходные величины;  $Z(x, y)$  — задающее воздействие (уставки)

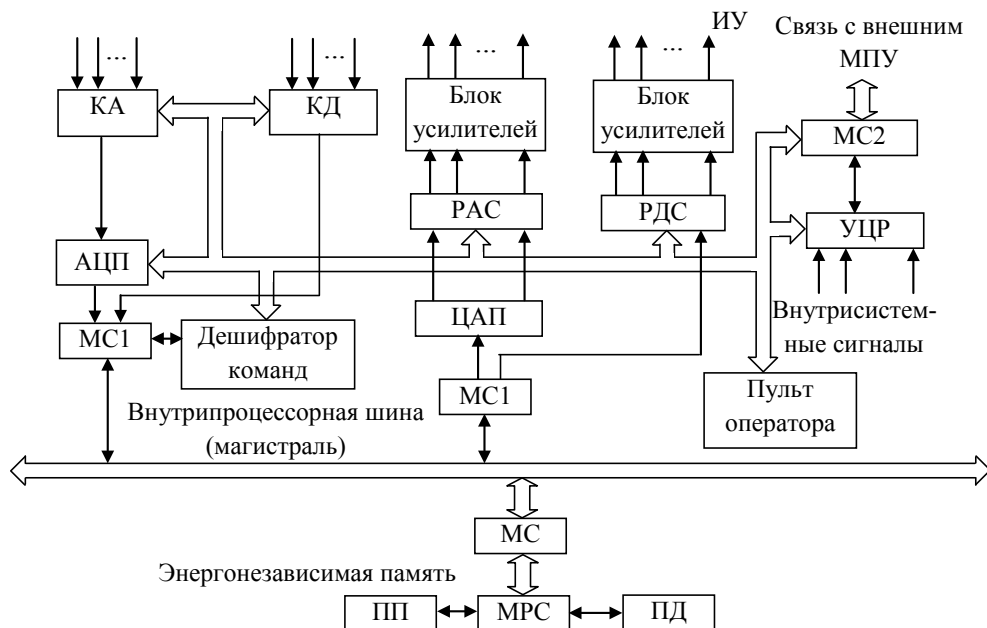


Рис. 11.2. Типовая информационная структура МПС:

УЦР — устройство цифровой регистрации; ИУ — исполнительное устройство;  
РДС — распределитель дискретных сигналов; КА — коммутатор аналоговый;  
КД — коммутатор дискретный; МС — модуль связи; ПП — память программ;  
ПД — память данных; РАС — распределитель аналоговых сигналов

## 12. ПРОМЫШЛЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ И ПРОГРАММИРУЕМЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ

---

**П**ромышленные компьютеры — изделия с повышенной устойчивостью к условиям с вредными факторами, которые имеют место в цехах заводов:

- пыль (вследствие воздухообмена);
- вибрация и удары;
- газ, пар, активные вещества;
- электромагнитные помехи.

Все эти факторы влияют на работу компьютеров, которые должны иметь специальную конструкцию, обеспечивающую защиту электроники:

1) пылезащищенность: герметичные корпуса, избыточное давление внутри блока, фильтры на всасывающих вентиляторах, брызгозащита на лицевой панели;

2) устойчивость к вибрациям и ударам: прочные шасси корпуса, крепление через амортизирующие скобы, специализированные дисковые накопители, вибростойкая подвеска;

3) конструкция, унификация: газ, пар, агрессивные вещества. Стандарт IEC529: IP 64 (шестиступенчатая защита от твёрдых тел, четырёхступенчатая защита от жидкости). Стандартные 19"-е стойки, модульность и расширяемость. Процессорная плата и периферийные устройства ставятся в объединительный кросс;

4) промышленный процессор глубоко интегрирован (шина VGA для связи с дисплеем, flash-карты (Memory disk), сторожевой таймер (если программное обеспечение зависло, то таймер перегружает систему);

5) обеспечение каналов сигнализацией и наблюдением за состоянием оборудования (вентиляция, источники питания, температура корпуса). Интерфейс с оператором — экран и клавиатура. Клавиатура — пыле- и влагозащитная конструкция;

б) широкий диапазон входных напряжений: 80–264 В (24, 48, 260 В) для надежного электропитания.

Особенности контроллеров для промышленного применения с точки зрения способов информирования, визуализации результатов:

- развитая система ввода/вывода информации;
- приспособленность структуры контроллера для работы в режиме реального времени;
- надёжность (источник питания, выполнение разъемов, печатных плат, охлаждение (конвекция));
- модульное исполнение устройств:
  - CPU — процессор;
  - CP — коммуникационный процессор;
  - FM — функциональные модули;
  - IM — интерфейсные модули (служат для расширения системы);
  - PS — модуль источника питания.

Требования к модулю источника питания:

- широкий температурный диапазон;
- защита от коротких замыканий;
- совместимость с бесперебойным источником;
- широкий диапазон входных напряжений.

Работа контроллера заключается в том, чтобы повторялся цикл (рабочий режим). В рабочем режиме выполняется бесконечный цикл, который состоит из нескольких стадий:

- 1) опрос внешних датчиков (чтение информации);
- 2) чтение состояния входов;
- 3) выполнение программы пользователя;
- 4) запись состояния выходов;
- 5) обслуживание аппаратных ресурсов (проверка состояния таймеров, контроллеров, интерфейсных модулей);
- 6) мониторинг системы исполнения (программа, которая следит за исполнением);
- 7) контроль времени цикла;
- 8) переход на начало цикла.

Существует два режима работы контроллера:

- рабочий — режим реализации управляющих функций;
- программирования — режим изменения настроек, смены реализуемых алгоритмов и т. п.

Языки, применяемые в промышленных компьютерах и программируемых контроллерах:

- IL — язык инструкций, наиболее удобен для простых программ;
- ST — структурированный текст (Pascal внешне);



LD — язык релейных схем;

FBD — язык функциональных блоков (электронные схемы).

**Стандарт IEC529** (защита от воздействий окружающей среды)

Этот стандарт определяет степень защиты оборудования от воздействий окружающей среды. Для обозначения степени защиты используется система кодов в виде IP XY, где X — степень защиты от твердых тел и пыли, а Y — степень защиты от влаги (табл. 12.1).

Таблица 12.1

Стандарт IEC529

Степень защиты	Защита от твердых тел X	Защита от влаги Y
0	Защита отсутствует	Защита отсутствует
1	Защита от тел диаметром более 50 мм	Защита от вертикально падающих капель воды
2	Защита от тел диаметром более 12 мм	Защита от капель воды, падающих под углом до 15° от вертикали
3	Защита от тел диаметром более 2,5 мм	Защита от дождя, падающего под углом до 60° от вертикали
4	Защита от тел диаметром более 1 мм	Защита от брызг воды, попадающих на оболочку с произвольного направления
5	Проникновение пыли не приводит к нарушению работоспособности системы	Защита от струи воды, выбрасываемой с произвольного направления
6	Проникновение пыли полностью исключается	Защита от сильной струи воды, выбрасываемой с произвольного направления
7	Не предусмотрено	Защита от проникновения воды при погружении на глубину около 150 мм
8	Не предусмотрено	Защита от проникновения воды при погружении на глубину, определяемую пользователем

**Стандарт IEC 297 на корпуса (19"-е конструктивы, Евромеханика)**

Стандарт определяет габариты щитов, пультов, блоков, модулей и других конструктивов:

- единица высоты конструктива —  $1U = 44,45 \text{ мм} = 1,75''$ ;
- единица ширины субблока или модуля —  $1HP = 5,08 \text{ мм} = 0,2''$ .

**Стандарт IEC 917 (метрические конструктивы)**

Стандарт определяет габариты щитов, пультов, блоков, модулей и других конструктивов:

- единица высоты конструктива —  $1SU = 25$  мм;
- единица ширины субблока или модуля —  $1mp1 = 25$  мм;  
 $1mp2 = 25$  мм;  $1mp3 = 2,5$  мм.

Устройства визуализации данных для оператора:

- моноблок, содержащий процессор, дисплей с сенсорным вводом;
- рабочая станция.

Особенности устройств оператора:

- встроенные средства ввода данных (трекбол, сенсорный ввод);
- пониженное энергопотребление в «спящем» режиме;
- долговечность дисплея;
- защита от электромагнитных полей;
- резервированное энергоснабжение;
- сменные фильтры вентиляторов.

### **Отличие программируемого контроллера от промышленного компьютера**

Промышленный компьютер — система универсального назначения (рис. 12.1).

Программируемый контроллер — система специализированного назначения.

Программируемый логический контроллер (ПЛК) имеет проблемно-ориентированное ПО (программное обеспечение) на конкретную задачу и аппаратное обеспечение.

Особенности ПЛК:

- автономная работа (долговременная работа без технического обслуживания), максимальное энергосбережение при минимальном энергопотреблении, наличие резервного источника питания, энергонезависимая память;
- программирование не предполагается частым, только при необходимости изменить какие-либо уставки;
- модульная структура (возможно наращивание дополнительных средств ввода/вывода);
- предусмотрен процесс слежения за объектом — цикл непрерывного сканирования;
- контроль времени выполнения задачи.

Назначение ПЛК:

- для замены устройств электроавтоматики;
- для реализации алгоритмов регулирования, динамического (результат зависит от времени) и нелинейного (логарифмического) преобразования в системах автоматического регулирования;
- координирующая функция (программные задатчики, контроллеры в распределенных устройствах).

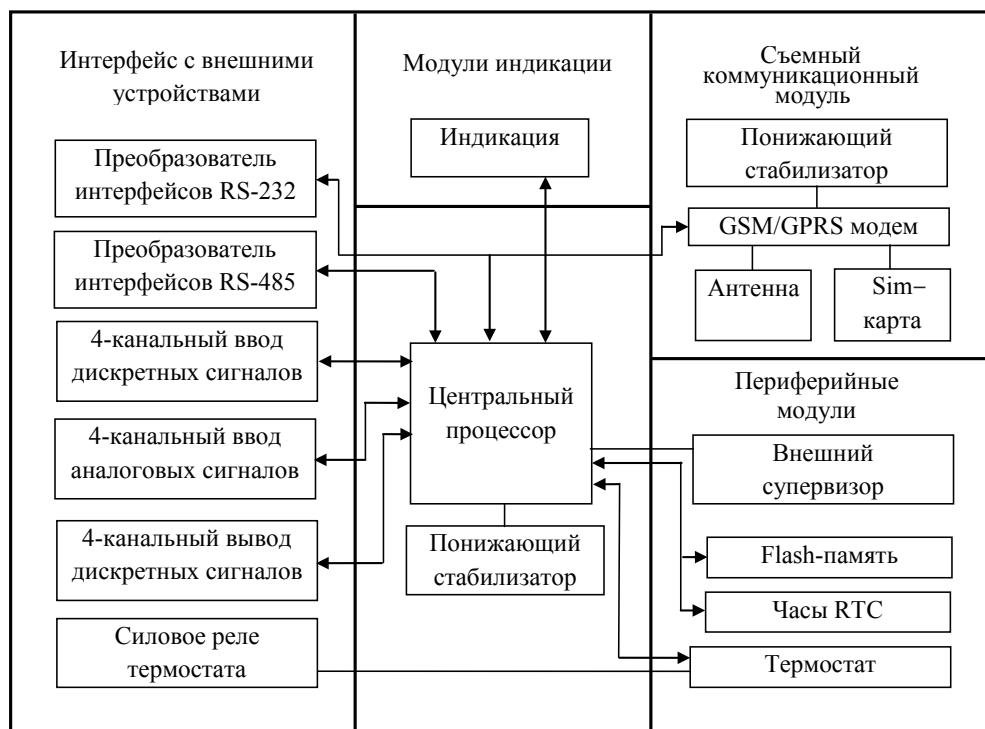


Рис. 12.1. Типовая структура промышленного контроллера

При выборе ПЛК следует учитывать нижеследующие факторы.

1. **Архитектура, наиболее подходящая для данного приложения (CISC или RISC).** По мере ужесточения требований к производительности МК заказчик, как правило, сразу переходит от CISC- к RISC-архитектуре. Однако на рынке имеются МК на базе CISC-архитектуры, работающие на частоте 80 МГц и обеспечивающие быстродействие 80 Mips. Для систем с уже имеющимся программным обеспечением или для средств воспроизведения высококачественного звука (проигрывания музыкальных программ или обучения) такие CISC-семейства МК вполне приемлемы.

2. **Дополнительные функции МК.** Независимо от того, как классифицирован МК (специализированный или универсальный), периферия микроконтроллера всегда играет важную роль при выборе прибора. Большинство современных микроконтроллеров располагает таким набором встроенных периферийных устройств, как порты ввода/вывода, таймеры, последовательные интерфейсы. Так, наличие встроенных средств отладки позволяет использовать МК в целевой системе на этапе проектирования и уже на этом этапе устранять неисправности всех регистров. Некоторые заказчики используют встроенные средства отладки для поиска неисправностей при эксплуатации. В современных микросхемах МК можно встретить и блоки

умножения/суммирования, 10/100 Base-T Ethernet интерфейс, интерфейс CAN-шины, USB, ВЧ-передатчик и графический драйвер. И наконец, некоторые микросхемы МК имеют настраиваемые в соответствии с требованиями заказчика логические блоки. Например, в микросхемы семейства FPLIC компании Atmel, помимо МК с AVR-ядром, входит программируемая матрица, содержащая до 40 тыс. вентиляей.

От числа входов/выходов и используемых в микросхеме периферийных устройств зависит тип корпуса и его разводка выводов. Современные МК поставляются в разнообразных корпусах: от малогабаритных типа SO8 до многовыводных с матричным расположением шариковых выводов (BGA). При этом современные корпуса микроконтроллеров, как и любых полупроводниковых приборов, должны соответствовать требованиям директивы RoHS.

**3. Скорость стирания/записи МК.** Иногда большой объем памяти МК нежелателен. Поскольку, как правило, МК в ходе производства системы репрограммируется два-три раза, время стирания/записи памяти становится важным его параметром. Время стирания данных с флэш-памяти емкостью 512 Кбайт новейших МК составляет 2–3 с. У многих современных устройств оно не меньше 40 с.

**4. Согласование значения быстродействия памяти ядра и флэш-памяти.** Во многих МК флэш-память уступает памяти ядра по быстродействию. В результате МК копирует данные флэш-памяти в ОЗУ и затем извлекает их уже из него. При выборе МК следует обращать внимание на этот фактор.

**5. Емкость памяти МК.** Увеличение емкости памяти ядра и применение флэш-памяти — неотъемлемые требования, предъявляемые к современным МК. Архитектура памяти МК всегда имела большое значение при проектировании системы. Наличие встроенной или необходимость применения внешней памяти, а также их объем всегда были ключевыми факторами при оценке стоимости построения системы и ее производительности. С увеличением емкости памяти появляется возможность добавления в микросхему МК самых разнообразных устройств: сетевых интерфейсов, графических контроллеров, контроллеров ЖКД, умножителя/сумматора, таймера, блоков ввода-вывода. К трем основным типам памяти, влияющим на выбор конкретного МК, относятся память программ (флэш, ПЗУ), память данных (ОЗУ, внешнее синхронное ДОЗУ), энергонезависимая память данных (ЭСРПЗУ, флэш).

В большинстве современных микросхем используются все три типа памяти. Так, микроконтроллеры AVR-семейства компании Atmel содержат флэш-память программ емкостью 1К–128 Кбайт, СОЗУ для хранения данных и ЭСРПЗУ небольшой емкости для хранения данных конфигурации и серийного номера. Благодаря такому набору памяти микроконтроллеры семейства весьма популярны для применения в универсальных промыш-

ленных системах и средствах безопасности. Применение флэш-памяти стимулировало необходимость сохранения данных после отключения питания и возможность репрограммирования изделий. Именно благодаря возможности изменения кода на последних этапах проектирования системы сегодня все чаще флэш-память заменяет в МК однократно программируемое ЗУ. Использование сегментированных флэш-блоков позволяет микроконтроллеру репрограммировать один сегмент памяти под управлением другого сегмента, не отключая питания. Флэш-память вытесняет и ПЗУ, которые пока еще достаточно широко применяются в МК крупносерийного производства. Это объясняется возможностью прямых отгрузок заказчику заранее запрограммированных заводом-производителем устройств. Тем самым сокращается длительный период освоения новой продукции и исключаются дорогостоящие этапы изменения кода, необходимые для приборов с ПЗУ. Флэш начинают конкурировать с ПЗУ и при создании устройств с батарейным питанием, где до сих пор благодаря малым рабочим напряжениям (0,9 В) доминировала постоянная память. Однако сейчас уже появилась флэш-память на напряжение 1,8 В. При выборе типа памяти данных, помимо требований, предъявляемых приложением, необходимо в первую очередь учитывать используемый код. Компиляторы Си требуют большого объема ОЗУ как для хранения переменных и указателей, так и с точки зрения размера стека. Наличие встроенной флэш-памяти, конечно, первоначально приводит к удорожанию микросхемы. Но это только первоначально, со временем стоимость их снижается.

**6. Цена выбранного МК.** Несомненно, стоимость играет важнейшую роль при выборе конкретного изделия. Но выбирать МК на основе лишь его стоимости нельзя. Следует не только как можно полнее проанализировать все элементы, определяющие стоимость МК, но и рассмотреть несколько сценариев.

**7. Выполнение кратко- и долгосрочных требований.** Заказчикам следует обращать внимание не только на характеристики и качество выбранного МК, но и на особенности поставщика. Например, какова интенсивность отказов изделий поставщика при эксплуатации и при производстве? Какие еще изделия выпускает поставщик? Сможет ли заказчик приобрести необходимые ему дополнительные устройства — другие типы микроконтроллеров, дисплеи и т. п.? Небезынтересны промышленные и географические области, в которых позиции поставщика наиболее сильны. Следует также выяснить, выпускается ли требуемый МК одним или несколькими предприятиями.

## 13. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

---

**Р**анее в основе прокладки промышленных сетей лежала проводная схема, которая обеспечивала связь между датчиками и регуляторами. Затем появились следующие предпосылки распространения и развития вычислительных промышленных сетей:

- экономический фактор: кремний для микросхем дешевеет, а медь для проводов дорожает;
- стоимость работ по централизованному обмену увеличивается;
- преимущество распределенного интеллекта.

Вводить распределенную структуру (сеть) следует, начиная с некоторого объема, протяженности, разбросанности обслуживаемых устройств.

### 13.1. СХЕМЫ СВЯЗИ КОНТРОЛЛЕРОВ С ОБЪЕКТАМИ УПРАВЛЕНИЯ

Централизованная схема содержит один контроллер, который средствами коммутации и кабельными сетями соединяется с объектами или их частями. В результате часто возникает звездообразная структура с большим числом параллельных информационных связей (рис.13.1).

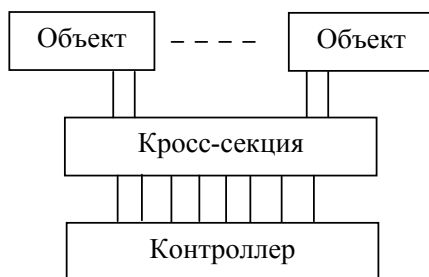


Рис. 13.1. Централизованная схема

По причине широкого распространения магистрально-модульного принципа построения систем рекомендуется переходить к другой после-

довательной схеме соединений, представленной на рис. 13.2, поскольку уменьшаются затраты на монтаж и комплектование линий связи, а современные последовательные линии обладают высоким быстродействием.



Рис. 13.2. Схема с сетью Fieldbus

В 1994 г. в организации Fieldbus Foundation (USA), объединяющей более 125 компаний, по согласованию с европейскими компаниями был введен стандарт сетей с древовидной последовательной архитектурой Fieldbus (IEC-61158-2), включающий восемь подстандартов на сети Foundation Fieldbus, Control Net, Profibus и т. д.

## 13.2. ТОПОЛОГИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ

Топология в промышленных сетях — это пространственный способ соединения взаимодействующих информационных устройств и технических средств системы. Во всех сетях различают узлы сети и связи между ними. Связи могут быть выполнены по разной топологии. Топология сети зависит от топологии размещения технических средств на объекте.

Существует несколько видов топологии сетей, отличающихся друг от друга по трем основным критериям: режим доступа к сети; средства контроля передачи и восстановления данных; возможность изменения числа узлов сети.

При проектировании сети следует учитывать:

- топологию размещения ТСАУ;
- объем передаваемой информации;
- возможность расширения сети;
- способ доступа к ресурсам сети.

Основные сетевые топологии:

- звезда (рис. 13.3, *а*);
- кольцо (рис. 13.3, *б*);
- шина (рис. 13.3, *в*).

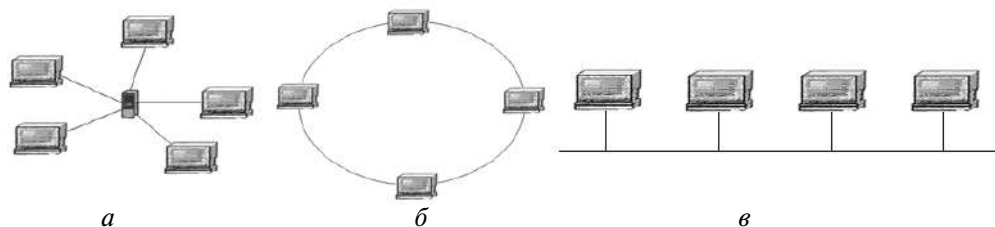


Рис. 13.3. Топология: *а* — звезда; *б* — кольцо; *в* — шина

### 13.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ТОПОЛОГИЙ

Характеристики основных топологий приведены в табл. 13.1.

Таблица 13.1

Сравнительные характеристики основных топологий

Характеристики	Звезда	Кольцо	Шина
Режим доступа	Доступ и управление через центральный узел	Децентрализованное управление. Доступ от узла к узлу	Возможен централизованный и децентрализованный доступ
Надежность	Сбой центрального узла — сбой всей системы	Разрыв линии связи приводит к сбою всей сети	Ошибка одного узла приводит к сбою всей сети
Расширяемость	Ограничено числом физических портов на центральном узле	Возможно расширение числа узлов, но время ответа снижается	Возможно расширение числа узлов, но время ответа снижается

Большинство промышленных сетей поддерживают 1-й, 2-й и 7-й уровни OSI-модели — физический, канальный и прикладной уровень передачи данных.

Физический уровень (уровень 1 OSI) обеспечивает необходимые механические, функциональные и электрические характеристики для установления, поддержания и размыкания физического соединения.

Канальный уровень (уровень 2 OSI) гарантирует передачу данных между устройствами. Этот уровень управляет не только сетевым доступом, но и механизмами защиты и восстановления данных в случае возникновения ошибок при передаче (стандарт HDLC).

Прикладной уровень (уровень 7 OSI) обеспечивает непосредственную поддержку прикладных процессов и программ конечного пользователя и управление взаимодействием этих программ с различными объектами сети передачи данных.

### 13.4. МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТУПА К СЕТИ

Метод доступа — это набор правил, позволяющий пользователям работать с локальной сетью, не мешая друг другу. Метод доступа реализуется на физическом уровне.

Существует два метода доступа к общей линии связи: централизованный и децентрализованный. Для децентрализованного множественного доступа к сети возможно возникновение «коллизий».



Коллизии — ошибки в результате попытки двух устройств одновременно передавать информацию в линию связи. Распознавание коллизий возможно по увеличенному значению амплитуды сигнала в линии.

Способы разрешения коллизий:

- отключить все устройства;
- отключить только одно устройство;
- по приоритету:
  - маркер — право на доступ к шине передается в цикле от устройства к устройству;
  - Master/Slave — выделяется узел, который называют Master; он адресует каждого пассивного участника, обеспечивает их данными и запрашивает у них данные. Master может быть не один.

## 14. ПРОМЫШЛЕННЫЕ СЕТИ

**Р**азличают следующие типы промышленных сетей:

- контроллерные сети (Fieldbus);
- сенсорные сети (Sensor/actuator level);
- универсальные сети (см. следующую главу).

Для сетей с шинами Modbus, Profibus, Interbus, CanOpen, DeviceNet, Control Net, AS-I имеются международные стандарты. Далее употребляются термины: сеть, протокол, шина, стандарт, которые определяют специфику организации промышленных сетей.

### 14.1. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТЕЙ ТИПОВ FIELDBUS И SENSORBUS

Поскольку различные разновидности промышленных сетей ориентированы на различные уровни систем автоматизации (рис. 14.1), то их технические характеристики отличаются по скорости передачи информации и дальности используемых линий связи (табл. 14.1, 14.2). Выбор необходимого оборудования определяется прежде всего условиями применения и экономикой проекта.

Таблица 14.1

Характеристики сетей типов Fieldbus и Sensorbus

Основные критерии	Fieldbus	Sensorbus
Расширение сети	100 м–10 км	До 1 км
Время цикла	10 мс–10 с	1 мс–1 с
Объем передаваемых данных, байт	8–сотни	1–8
Доступ к шине	Фиксированный/Свободный	Свободный
Цена среды передачи	Низкая	Очень низкая
Цена подсоединения одного узла	\$150–500	\$10–100
Примеры	Profibus, Bitbus, Control Net	Hart, Modbus, AS-I

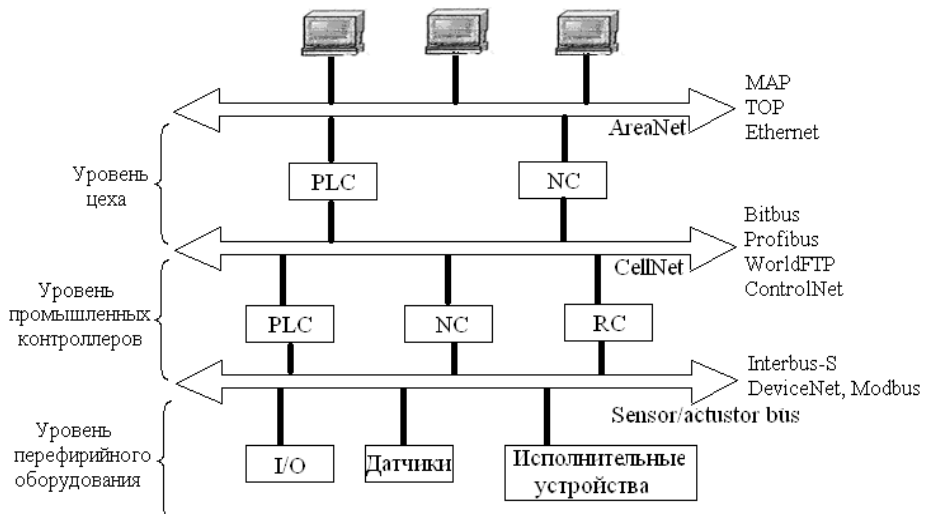


Рис. 14.1. Обобщенная сетевая структура

## 14.2. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Характеристики промышленных сетей приведены в табл. 14.2.

Таблица 14.2

Характеристики промышленных сетей (сенсорные сети)

Шина	Топология сети	Физическая линия связи	Максимальное число устройств	Максимальная длина соединения	Скорость обмена
HART	Точка-точка, звезда, шина	Пара проводников	15	Неограниченная	1,2 Кбит/с
Modbus	Линейная	ВП	32 узла на сегмент, не более 64 узлов	500 м на сегмент	1 Мбит/с
AS-I	Общая шина, кольцо, древовидная, звездообразная	Двухжильный кабель	31 подчиненное устройство	100 м, с ретранслятором 300 м	167 Кбит/с
DeviceNet	Магистральная линия/многоотводная линия	ВП для передачи сигнала и напряжения питания	64 узла	500 м (зависит от скорости передачи), с ретрансляторами до 6 км	125, 250 или 500 Кбит/с

Примечание. ВП — витая пара.

**HART** — протокол реализует принцип частотной модуляции для организации цифровой передачи. На аналоговый сигнал 4–20 мА накладывается частотно-модулированный цифровой сигнал с амплитудой колебаний  $\pm 0,5$  мА. Логической единице соответствует частота 1 200 Гц, логическому нулю — 2 200 Гц.

Формат кадра: 1St 8D 1CRC 1Sp (St — стартовый бит; D — данные; CRC — контрольный бит; Sp — стоповый бит).

**Modbus** — распространенный протокол байтового обмена на основе интерфейса RS-485.

**Интерфейс AS-I.** Основная задача AS-интерфейса нижнего уровня — связать в единую информационную структуру устройства нижнего уровня распределенной системы управления, а именно датчики и другие исполнительные устройства. Для кодирования данных используется манчестерский код, в котором 0 и 1 кодируются по восходящему и нисходящему фронту сигнала.

Формат кадра:

Master — запрос

ST	SB	A0... A4	I0... I4	PB	EB
----	----	----------	----------	----	----

Slave — ответ

ST	I0... I3	PB	EB
----	----------	----	----

**DeviceNet.** Данные посылаются по необходимости короткими пакетами.

### 14.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЛЕРНЫХ СЕТЕЙ

Характеристики контроллерных сетей приведены в табл. 14.3.

Таблица 14.3

Характеристики промышленных сетей (контроллерные сети)

Шина	Топология сети	Физическая линия связи	Максимальное число устройств	Максимальная длина соединения	Скорость обмена
Bitbus	З, К	КК, ВП	250	1 км	500, 1200 Кбит/с
Profibus	Линейная, З, К	ВП, ВОК	127 узлов (124 подчиненных — 4 сегмента, 3 ретранслятора) и 3 главных устройства	До 24 км (ВОК)	12 Мбит/с
CAN Open	Магистральная/отводная	ВП+дополнительная для сигнала и напряжения питания	127 узлов	25–1 000 м (зависит от скорости передачи)	125, 250, 500 и 1000 Кбит/с

*Примечание.* З — звезда; К — кольцо; КК — коаксиальный кабель; ВП — витая пара; ВОК — волоконно-оптический кабель.

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

- синхронный ( $L_{\text{линии}} = 30$  м,  $C = 500\text{--}2400$  Кбод);
- асинхронный ( $C = 375$  Кбод при  $L_{\text{линии}}$  до 300 м,  $C = 62,5$  Кбод при  $L_{\text{линии}}$  до 1200 м).

**Profibus** — самый распространенный стандарт, получивший широкое распространение усилиями фирмы Siemens. Говоря о Profibus, необходимо иметь в виду, что под этим общим названием понимается совокупность трех различных протоколов: Profibus-DP, Profibus-FMS, Profibus-PA. Profibus-PA — это стандарт для использования на взрывоопасных производствах.

Сеть Profibus — это комплексное понятие, оно основывается на нескольких стандартах и протоколах. Сеть отвечает требованиям международных стандартов IEC 61158 и EN 50170.

*Достоинства:* высокая скорость передачи данных, широкий спектр применения, учтены требования различных пользователей.

*Недостатки:* относительно высокие накладные расходы при передаче коротких сообщений, отсутствие подачи питания по шине, высокая стоимость.

**Шина CAN Open** — для быстродействующих систем управления перемещением.

*Достоинства:* рациональное использование пропускной способности (существует система приоритетов), подача напряжения по сигнальному кабелю.

*Недостатки:* этот протокол известен только в Европе, сложность протокола, его запутанность, ограниченный размер сообщения, ограниченная длина соединения.

## 15. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СЕТИ

---

**К** числу универсальных промышленных сетей относятся сети Foundation Fieldbus, Ethernet и сети с шиной Profibus-DP, которые будут рассмотрены в данной главе.

### 15.1. СЕТЬ FOUNDATION FIELDBUS

Foundation Fieldbus представляет собой открытый протокол, позволяющий использовать программно-аппаратные средства различных производителей. Разработан в 1998 году. Область применения: управление непрерывными процессами, нефте- и газопереработка.

*Достоинства:*

- протокол, имеющий много возможностей;
- безопасные шины.

*Недостатки:*

- ориентация на промышленность;
- ограниченный набор совместимых устройств;
- «затянутость» процессов в стандартизации.

### 15.2. СЕТЬ ETHERNET

Ethernet — открытый промышленный сетевой стандарт, который поддерживает неявный обмен сообщениями, явный обмен или оба. Технология Ethernet используется с середины 70-х годов XX века.

*Достоинства:*

- самый распространенный мировой стандарт;
- поддерживает передачу с высокой скоростью;
- предназначен для крупных систем.

*Недостатки:*

- большие издержки при передаче коротких сообщений;
- питающее напряжение не подается по сетевому кабелю;
- повышенная чувствительность к электромагнитным помехам;

— большое разнообразие открытых и фирменных стандартов обработки данных.

Сеть Ethernet использует протокол стандарта TCP/IP — протокол управления и передачи — протокол Интернета.

### 15.3. ШИНА PROFIBUS-DP ФИРМЫ SIEMENS

Является высокоскоростной полевой шиной, соответствующей требованиям к промышленной передаче данных. Profibus-DP представляет собой линейную шину с централизованным способом доступа в режиме «ведущий/ведомый». Правами доступа к шине обладают только ведущие устройства, называемые также активными. Ведомые устройства могут только отвечать на запросы. Возможен также обмен данными между несколькими ведущими устройствами по протоколу маркерной шины. Физический уровень шины Profibus-DP — интерфейс RS-485. Сводка технических характеристик протокола PROFIBUS-DP приведена в табл. 15.1.

Таблица 15.1

Сводка технических характеристик протокола PROFIBUS-DP

Характеристики	Особенности Profibus-DP
Технология передачи	PROFIBUS DIN 19245, Часть 1 Витая пара или оптоволоконный кабель EIA RS 485; 9,6 Кбит/с до 1,5 Мбит/с Максимальное расстояние 200 м при 1,5 Мбит/с, расширяемое с помощью повторителей
Доступ к передающей среде	Гибридный протокол доступа к передающей среде в соответствии с DIN 19245, Часть 1 Поддерживаются системы с одним ведущим или несколькими ведущими устройствами Ведущие и ведомые устройства (возможно подключить до 126 станций)
Взаимодействие	Точка-точка (передача пользовательских данных) или многопунктовые (синхронизация) Периодическая передача пользовательских данных между ведущим и ведомым устройствами и непериодическая передача данных между ведущими устройствами
Синхронизация	Синхронизация вводных и/или выводных данных всех ведомых DP-устройств Sync-режим: синхронизируются все выводные данные Freeze-режим: синхронизируются все вводные данные

Окончание табл. 15.1

Характеристики	Особенности Profibus-DP
Функциональные возможности	<p>Циклические передачи пользовательских данных между ведущими DP-устройствами или ведомыми DP-устройствами</p> <p>Циклические передачи пользовательских данных между ведущими DP-устройствами или ведомыми DP-устройствами</p> <p>Проверка конфигурации ведомых DP-устройств</p> <p>Мощные диагностические возможности, 3 иерархических уровня диагностических сообщений</p> <p>Синхронизация входных и/или выходных данных</p> <p>Присвоение адресов через шину ведомым DP-устройствам</p> <p>Присвоение адресов через шину ведомым DP-устройствам</p> <p>Максимум 246 байтов входных и выходных данных на ведомое DP-устройство, обычно — 32 байта</p>
Механизмы защиты	<p>Все сообщения передаются с хемминговым расстоянием <math>HD = 4</math></p> <p>Сторожевые таймеры в ведомых DP-устройствах</p> <p>Защита доступа к входной/выходной информации в ведомых DP-устройствах</p> <p>Отслеживание передач данных с использованием настраиваемого таймера в ведущем DP-устройстве (DPM1)</p>
Типы устройств	<p>Ведущее DP-устройство класса 2 (DPM2), например программирующее/конфигурирующее устройство</p> <p>Ведущее DP-устройство класса 1 (DPM1), например центральный контроллер, такой как PLC, CNC, RC</p> <p>Ведомое DP-устройство, например устройство двоичного или аналогового ввода/вывода, приводы</p> <p>Установка и соединение кабелем: подключение или отсоединение станций без влияния на другие станции</p> <p>Надежность и простота управления двухпроводной техникой передачи</p>
Производительность	<p>Передача 512 бит входных и выходных данных, распределенных между 32 станциями, занимает в шине PROFIBUS-DP приблизительно 6 мс (этого достаточно для удовлетворения требования небольшого времени реакции системы)</p>
Установка и обслуживание	<p>Структура шины позволяет подключать или отсоединять станции без влияния на другие станции; кроме того, можно наращивать систему постепенно, дальнейшее развитие системы не влияет на конфигурацию ранее установленных станций</p>



Согласно модели OSI на втором уровне реализуются функции управления доступом к шине, обеспечивается безопасность данных, а также выполнение протокола передачи и формирование телеграмм. Уровень 2 обозначается в PROFIBUS как FDL-уровень (Fieldbus Data Link). Формат телеграммы уровня 2 способствует большей безопасности передачи. Вызывающая телеграмма имеет расстояние Хемминга HD (Hamming Distance) = 4. При HD = 4 может быть распознано до трёх одновременных ошибок в фальсифицированных битах телеграммы данных. Это достигается благодаря применению особых стартового и завершающего знаков телеграммы, постоянно скользящей синхронизации, биту четности и контрольному байту.

При этом могут быть распознаны следующие ошибки:

- символьного формата (четность, переполнение, ошибка фрейма);
- протокола;
- разделителей начала и окончания;
- байта проверки фрейма;
- длины телеграммы.

На рис. 15.1 рассматриваются кадры с переменной длиной информационного блока.

SD2	LE	LEr	SD2	DA	SA	FC	Data-unit	FCS	ED
-----	----	-----	-----	----	----	----	-----------	-----	----

Рис. 15.1. Формат кадра с переменной длиной информационного блока:

L — длина информационного поля (4–249), включает в себя DA, SA, FC, Data-unit, FCS; SD2 — стартовый бит для отличия различных форматов телеграмм; LE/LEr — байт длины, указывающий длину информационных полей у телеграмм с переменной длиной; DA — байт адреса цели, содержащий информацию о приемнике; SA — байт адреса источника, содержащий информацию о передатчике; FC — контрольный байт, содержащий информацию о службе для данного сообщения и приоритет сообщения; Data-unit — поле данных; FCS — проверочный байт, содержащий контрольную сумму телеграммы; ED — байт-указатель конца телеграммы

## 15.4. УСТРОЙСТВА МЕЖСЕТЕВОГО СОПРЯЖЕНИЯ

На предприятиях часто используются промышленные сети разных типов, поэтому возникают проблемы передачи информации между ними. Ниже приведены примеры устройств для выполнения этих задач.

### Сетевые контроллеры фирмы Hilsher

Устройства поддерживают Fieldbus-технологии и стандарты IBM PC совместимых и промышленных компьютеров. Эти контроллеры поддерживают следующие стандарты: Modbus, Profibus, Interbus, CanOpen, DeviceNet, Control Net, AS-I.

### **Универсальный шлюз NET TAP**

Объединение устройств с различными интерфейсами в единую информационную сеть возможно через сетевые устройства типа шлюза. Экономичный, компактный, модульный шлюз с двумя интерфейсами для оконечного устройства (RS-232, RS-422/485, Ethernet) и для промышленных сетей Profibus, DeviceNet, Can Open рассмотрим на примере устройств NET TAP, Anybus-X, VBG.

#### **NET TAP NT50**

Интегрирует устройства Fieldbus в Ethernet.

Размеры: 100×65×25 мм.

Степень защиты: IP20.

Присоединяется на DIN-рейку.

Питание: DC 18–30 В.

#### **Шлюз Anybus-X**

Для устройств Profibus Master — Interbus Slave.

Поддерживает медное соединение и оптоволоконное.

Технические характеристики:

- Profibus: 9,6–1200 Кбод — 244 байта;
- Interbus: 500–2000 Кбод — 10 байт.

Для обеспечения помехоустойчивости применяется гальваническая развязка.

Порт конфигурации — RS-232.

Настройка через Profibus, NetTool PB.

#### **Шлюзы фирмы Pepperl+Fuchs**

Шлюзы позволяют эффективно соединять соединять сети AS-I с промышленными сетями: Can Open, DeviceNet, Profibus, Modbus — DP, Modbus — TCP.

Устройство контролирует два сегмента AS-I. Выступает стандартным устройством в сети Modbus/TCP. Через протокол Modbus доступен весь объем данных устройств AS-I. Функции настройки и загрузки выполняются удаленно по Ethernet.

## 16. УСТРОЙСТВА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

---

**У**стройства отображения информации предназначены для обеспечения эффективного взаимодействия человека-оператора с системой управления и автоматизируемым объектом. Результаты такого взаимодействия влияют на принятие тех или иных решений в процессе эксплуатации САУ. Поэтому роль устройств отображения информации в общем комплексе средств автоматизации достаточно велика. Выбор их при проектировании ТСАУ определяется конкретным функциональным назначением устройств отображения информации с учетом психофизиологических особенностей человека. С этих позиций в главе рассмотрены принципы построения современных типовых устройств отображения информации.

Устройствами отображения информации называются технические средства, предназначенные для создания динамических, информационных моделей контролируемых или управляемых объектов. Для этого используются средства отображения со схемами ввода информации, схемами управления. Средства отображения предназначаются для повышения эффективности работы оператора-технолога за счет усиления его сенсорных, интеллектуальных и исполнительных функций. С этих точек зрения средства отображения относятся к группе устройств для использования командной информации в целях воздействия на процесс и для связи с оператором. В число этих устройств входят абонентские пульта, диспетчерские щиты, панели, разнообразные средства контроля и регулирования.

По характеру отображаемой информации различают знаковые (табло на знаковосинтезирующих индикаторах, знаковые дисплеи), графические (регистрирующие приборы), знакографические или универсальные (мозаичные табло и мнемосхемы, дисплеи) устройства.

Требования, предъявляемые к устройствам отображения информации:

- информационная емкость;
- качество отображения информации;
- быстродействие;
- надежность;
- удобство подсоединения к источникам информации;
- наличие средств тревожной сигнализации.

Для выяснения наиболее информативного способа подачи сведений оператору были поставлены специальные психофизиологические опыты. Выяснилось, что скорость реакции оператора на вновь появляющуюся информацию зависит от формы подачи материала, а именно задержка реакции может быть на порядок меньше для реалистичных художественных изображений складывающейся ситуации по сравнению с табличным представлением в виде колонок цифрового материала (табл. 16.1). Очевидно, ассоциативный образ мышления, присущий человеку-оператору, необходимо учитывать при разработке устройств представления информации, особенно требующей немедленного вмешательства оператора в технологический процесс.

Таблица 16.1

Зависимость скорости реакции оператора от формы представления информации

Форма представления информации	Задержка реакции, мс
Таблица чисел	5 000
Слово, текст	2 800
Контурный рисунок	2 500
Черно-белый рисунок	1 200
Цветное объемное изображение	400

Современный способ создания динамической информационной модели объекта в виде схемно-художественного изображения предполагает отображение на экране дисплея цветной схемы с реалистичными рисунками важных частей управляемого объекта, например баков, насосов, трубопроводов, конвейерных линий и т. п. Такое изображение получило название мнемосхемы. Информация о параметрах технологического процесса может выводиться на мнемосхему цифрами или в виде условных индикаторов — стрелочных или линейно-уровневых. Оператор лучше воспринимает информацию об отклонениях в наблюдаемом процессе

по показаниям условных индикаторов. Таким образом, хорошо передается уровень наполнения различных емкостей, температура вещества передается изменением цвета, а давление — деформацией корпуса емкости. Разумеется, оператор в любой момент может вызвать на экран полную и точную информацию в виде таблиц и графиков, однако опыт показывает, что человек в основном ориентируется на представленное ассоциативное изображение.

В основе конструирования мнемосхем используется несколько принципов:

- *принцип лаконичности*, согласно которому мнемосхема должна быть простой, не должна содержать лишних, затемняющих элементов, а отображаемая информация должна быть четкой, конкретной и краткой, удобной для восприятия и дальнейшей переработки;

- *принцип обобщения и унификации* предусматривает требование, согласно которому надо выделять и использовать наиболее существенные особенности управляемых объектов, то есть на мнемосхеме не следует применять элементы, обозначающие несущественные конструктивные особенности системы, а символы сходных объектов и процессов необходимо по возможности объединять и унифицировать;

- *принцип акцента* подразумевает, что элементы контроля и управления на мнемосхемах, наиболее существенные для оценки состояния, принятия решения и воздействия на управляемый объект, необходимо выделять размерами, формой или цветом;

- *принцип автономности* предусматривает необходимость обособления друг от друга участков мнемосхемы, соответствующих автономно контролируемым и управляемым объектам и агрегатам. Эти обособленные участки должны быть четко отграничены от других и, согласно принципу структурности, должны иметь завершенную, легко запоминающуюся и отличающуюся от других структуру. Структура должна отражать характер объекта и его основные свойства;

- *принцип пространственного соотношения элементов контроля и управления*, согласно которому расположение контрольно-измерительных и индикаторных приборов должно быть четко согласовано с расположением соответствующих им элементов управления, то есть должен соблюдаться закон совместности стимула и реакции;

- *принцип использования привычных ассоциаций и стереотипов* предполагает применение на мнемосхемах таких условных обозначений параметров, которые ассоциируются с общепринятыми буквенными обозначениями этих параметров. Желательно применять, если это возможно, вместо абстрактных знаков символы, ассоциирующиеся с объектами и процессами.

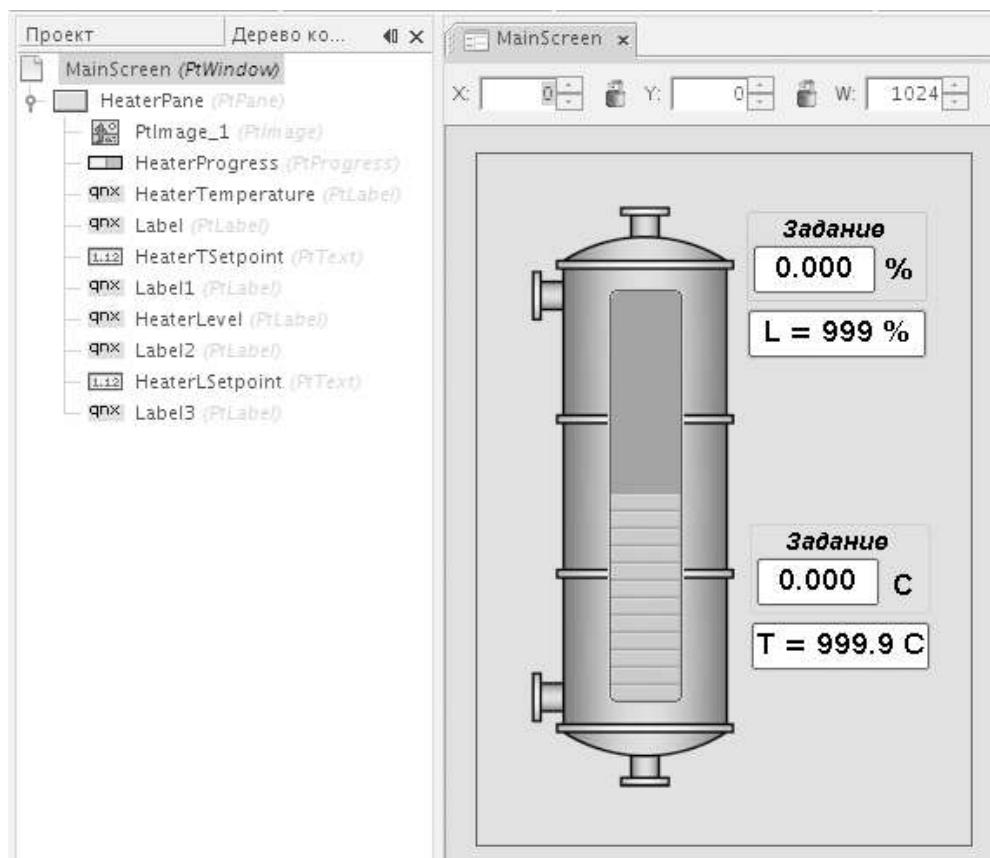


Рис.16.1. Пример мнемосхемы пароводяного котла с полями для отображения параметров и уставок регулятора

## 17. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**И**сполнительное устройство — это силовое устройство, предназначенное для изменения регулирующего воздействия на объект управления в соответствии с сигналом управления, поступающим на его вход от командного устройства. Исполнительное устройство (ИУ) в общем случае состоит из двух основных частей (рис. 17.1): исполнительного механизма (ИМ) и регулирующего органа (РО).

ИУ — силовое устройство для изменения регулирующего воздействия на объект в соответствии с сигналом от командного устройства. ИМ — исполнительный механизм (пневматические, гидравлические, электрические, мембранные дроссели, изменяющие сопротивление в системе). РО — регулирующий орган в виде клапана, шибера и т. п.

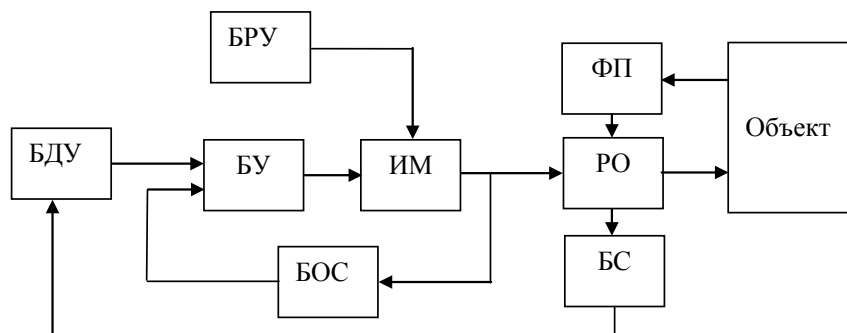


Рис. 17.1. Схема исполнительного устройства с обратной связью для реализации управляющих воздействий на объект:

БДУ — блок дистанционного управления; БРУ — блок ручного управления; БУ — блок усилителей; БОС — блок обратной связи; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулирующий орган; ФП — фиксатор положений; БС — блок сигнализации (отражает состояние сигналов всех блоков)

## 17.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ И РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ

Классификация исполнительных механизмов (рис. 17.2) производится в первую очередь по виду энергии, создающей усилие (момент) перемещения регулирующего органа. Соответственно ИМ бывают пневматические, гидравлические и электрические.

В **пневматических ИМ** усилие перемещения создается за счет давления сжатого воздуха на мембрану, поршень или сильфон; давление обычно не превышает 103 кПа.

В **гидравлических ИМ** усилие перемещения создается за счет давления жидкости на мембрану, поршень или лопасть; давление жидкости в них обычно находится в пределах  $(2,5\text{--}20) \cdot 10^3$  кПа. Отдельный подкласс гидравлических ИМ составляют ИМ с гидромуфтами.

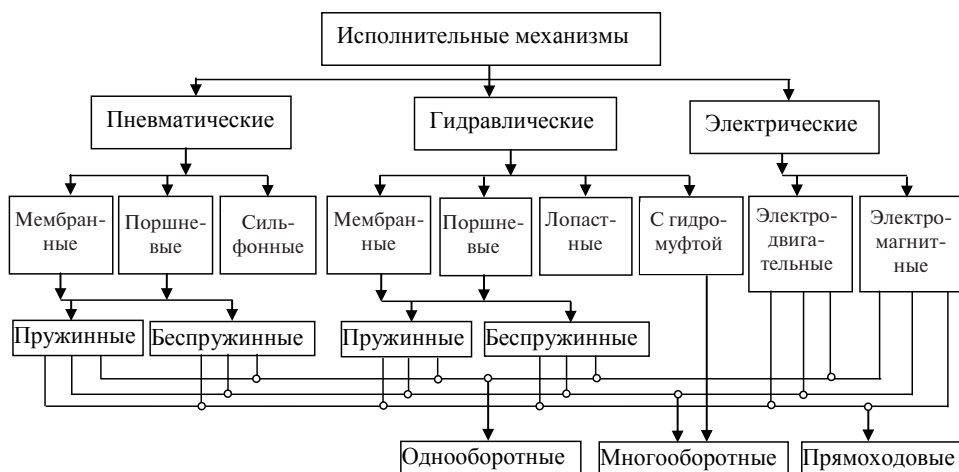


Рис. 17.2. Классификация исполнительных механизмов

Пневматические и гидравлические мембранные и поршневые ИМ подразделяются на пружинные и беспружинные. В пружинных ИМ усилие перемещения в одном направлении создается давлением в рабочей полости ИМ, а в обратном направлении — силой упругости сжатой пружины. В беспружинных ИМ усилие перемещения в обоих направлениях создается перепадом давления на рабочем органе механизма.

**Электрические ИМ** по принципу действия подразделяются на электродвигательные (электромашинные) и электромагнитные.



По характеру движения выходного элемента большинство ИМ подразделяются на прямоходные с поступательным движением выходного элемента, поворотные с вращательным движением до  $360^\circ$  (однооборотные) и с вращательным движением на угол более  $360^\circ$  (многооборотные).

Существуют ИМ, в которых используется одновременно два вида энергии: электропневматические, электрогидравлические и пневмогидравлические. Вид энергии управляющего сигнала может отличаться от вида энергии, создающей усилие перемещения.

В электрических системах автоматизации и управления наиболее широко применяются электромашинные и электромагнитные исполнительные механизмы.

Основным элементом **электромашинного ИМ** является электрический двигатель постоянного или переменного тока. Такие исполнительные механизмы обычно называют электроприводами, т. к. электропривод — это электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, электрического преобразовательного, механического передаточного, управляющего и измерительного устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

**Электромагнитные ИМ** дискретного действия выполняются в основном на базе электромагнитов постоянного и переменного тока и постоянных магнитов. Жесткое и упругое соединение узлов систем осуществляют различного рода электромагнитные муфты.

Множество регулирующих органов так же многообразно, как многообразны объекты управления. В качестве примера можно привести основные типы РО, применяемых в системах подачи и перемещения жидких, газо-образных и сыпучих материалов. По виду воздействия на объект их можно подразделить на два основных типа: дросселирующие и дозирующие.

**Дросселирующие РО** изменяют сопротивление (гидравлическое, аэродинамическое) в системе путем изменения своего проходного сечения, воздействуя на расход вещества. Примерами таких РО являются заслонки, диафрагмы, задвижки, краны, клапаны.

**Дозирующие РО** выполняют заданное дозирование поступающего вещества или энергии за счет изменения производительности определенных агрегатов: дозаторов, насосов, компрессоров, питателей, электрических усилителей мощности.

## 17.2. КЛАССИФИКАЦИЯ, СТРУКТУРЫ И СОСТАВ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Электромашинные ИМ (электроприводы) можно классифицировать по различным признакам (рис. 17.3).



Рис. 17.3. Классификация электромашинных ИМ

### *По роду тока электродвигателя*

В ИМ постоянного тока применяются коллекторные и бесконтактные двигатели постоянного тока, в ИМ переменного тока — асинхронные и синхронные двигатели.

### *По характеру движения*

Вращательные ИМ приводятся в движение вращающимися двигателями, прямоходные ИМ — вращающимися двигателями с механическими преобразователями вращательного движения в возвратно-поступательное или непосредственно линейными двигателями. Каждый из этих ИМ может быть непрерывным или дискретным. В ИМ непрерывного действия в установившемся режиме подвижные части находятся в состоянии непрерывного движения, в дискретном — в состоянии дискретного (шагового) движения.

### *По степени управляемости*

Нерегулируемый ИМ предназначен для приведения в действие РО объекта управления с одной рабочей скоростью; параметры ИМ (например, скорость, момент и др.) изменяются только в результате возмущающих воздействий. Ре-

гулируемый ИМ может приводить в действие РО с изменяемой скоростью; параметры ИМ изменяются под воздействием управляющего устройства.

#### *По степени автоматизации*

Автоматизированным называется регулируемый ИМ с автоматическим регулированием параметров. К этому типу относятся программно-управляемые, следящие и адаптивные ИМ. В программно-управляемом ИМ управление движением РО осуществляется по закону, определенному заранее и заданному программой. Частным случаем таких ИМ можно считать позиционный ИМ, предназначенный для перемещения РО из одного фиксированного положения в другое. Следящий ИМ автоматически обрабатывает перемещение РО в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом. Адаптивный ИМ обладает способностью автоматически избирать структуру и (или) параметры системы управления при изменении условий работы объекта управления в целях выработки оптимального режима.

Автоматизированный ИМ в большинстве случаев является замкнутым, т. е. действующим на основе принципа обратной связи. Исключение составляет автоматизированный дискретный ИМ с шаговыми двигателями, который может быть разомкнутым. Неавтоматизированный ИМ имеет ручное управление.

В зависимости от типа ИМ и его конкретного назначения он может иметь различную структуру и состав технических средств.

#### **Типовые структуры и оборудование электромашинных ИМ**

Обобщенная структурная схема автоматизированного электромашинного (ИМ) (электропривода) представлена на рис. 17.4.

Обязательным силовым блоком является электромеханический преобразователь энергии, состоящий из конструктивно объединенных или раздельных исполнительного двигателя (ИД) и механического передаточного устройства (ПУ) (например, редуктора, муфты).

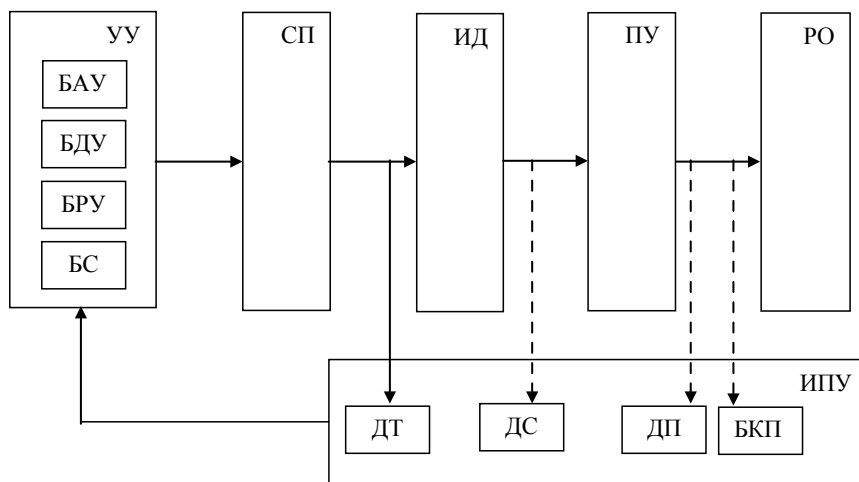


Рис. 17.4. Обобщенная структурная схема автоматизированного электромашинного ИМ

Питание двигателя осуществляется в общем случае через силовой электрический преобразователь (СП), который может представлять собой:

- транзисторный, тиристорный или магнитный усилитель мощности;
- полупроводниковый управляемый либо неуправляемый выпрямитель или инвертор;
- полупроводниковый широтно-импульсный преобразователь;
- регулируемый или нерегулируемый силовой трансформатор;
- контактную коммутирующую аппаратуру — электромагнитные реле, пускатели, контакторы.

К несиловым блокам, обеспечивающим выполнение требуемых функций в зависимости от назначения и области применения исполнительного механизма, относятся устройство управления (УУ) и измерительно-преобразовательное устройство (ИПУ).

В устройство управления в общем случае входят:

- блок автоматического управления (БАУ), содержащий аналоговые или цифровые регуляторы;
- блок дистанционного управления коммутирующей аппаратурой (БДУ);
- блок ручного механического управления (БРУ) регулирующим органом (РО) (дублер дистанционного);
- блок сигнализации (БС).

Измерительно-преобразовательное устройство ИПУ может иметь в своем составе датчик тока двигателя (ДТ), датчик скорости (ДС) и датчик текущего положения (ДП) исполнительного механизма. В состав ИПУ может также входить блок конечных положений (БКП) исполнительного механизма или регулирующего органа, состоящий из путевых и конечных выключателей, выдающих дискретный сигнал при достижении соответствующего конечного положения.

При разработке промышленных систем автоматизации и управления весьма широко применяются типовые конструкции, в частности типовые комплектные и унифицированные исполнительные устройства.

Комплектным исполнительным механизмом (электроприводом) принято называть комплект взаимосвязанного оборудования, которое предназначено для исполнительных устройств с некоторыми определенными функциями, объединяется общей электрической схемой и поставляется полностью (или в большей части) комплектно.

Комплектные ИМ, выпускаемые для металлообрабатывающих станков и установок с числовым программным управлением, обрабатывающих центров и промышленных роботов, имеют, как правило, в своем составе следующее типовое оборудование:

- транзисторный либо тиристорный силовой преобразователь, обеспечивающий однозонное якорное либо двухзонное с ослаблением магнит-

ного поля управление двигателем постоянного тока или частотное управление трехфазным асинхронным двигателем;

- устройство согласования преобразователя с питающей сетью, например трансформатор;
- устройство управления преобразователем;
- систему автоматического регулирования основных параметров ИМ;
- отдельные блоки электрических измерений, защиты и сигнализации;
- исполнительный двигатель постоянного тока (коллекторный или бесконтактный) или трехфазный асинхронный со встроенным либо пристраиваемым датчиком скорости (тахогенератором электромашинного или фотоэлектрического типа), датчиком положения (вращающимся трансформатором, сельсином или фотоэлектрическим преобразователем) и, при необходимости, электромагнитным тормозом;
- механическое передаточное устройство (преобразователь движения вращательного или вращательно-поступательного типа, муфта) в виде отдельной конструкции или в виде единой конструкции с двигателем (мотор-редуктор).

Электрооборудование первых пяти групп выполняется обычно в виде комплекта устройств управления (шкафов, блоков, пультов), объединенных общей электрической схемой и обеспечивающих необходимое взаимодействие всех элементов исполнительного механизма. Этот комплект является, как правило, обязательной составной частью комплектного ИМ, а его выход — выходом силового электрического преобразователя.

В исполнительных механизмах узкого назначения или малой мощности электродвигатель и передаточное устройство входят непосредственно в комплект поставки, в остальных случаях заказываются отдельно.

Унифицированные электромашинные исполнительные механизмы, применяемые для перемещения регулирующих органов типа заслонок, задвижек, кранов и т. д. в химической промышленности, на топливных и водно-канализационных трубопроводах, в вентиляционных системах и силовой контактной электрокоммутирующей аппаратуре, имеют, как правило, в своем составе следующие блоки типовой структуры:

- комплект из однофазного или трехфазного асинхронного двигателя и передаточного устройства с вращательным или возвратно-поступательным выходным движением;
- силовой электрический блок в виде контактной или бесконтактной коммутирующей аппаратуры и, при необходимости, различных усилителей;
- устройство управления с блоками дистанционного и ручного управления, а также блоками сигнализации и защиты;
- измерительно-преобразовательное устройство с концевыми и путевыми выключателями и, при необходимости, резистивными, индуктивными и токовыми схемами измерения текущего положения и скорости.

Такие ИМ работают в основном в режиме позиционирования с нерегулируемой или регулируемой в узком диапазоне скоростью.

#### **Требования к электромашинным исполнительным механизмам**

Основные требования к большинству электромашинных ИМ можно сформулировать следующим образом:

- минимальные габариты электродвигателя при высоких значениях вращающего момента и мощности;
- значительные допустимые перегрузки привода в кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы;
- широкий диапазон регулирования скорости;
- высокая стабильность характеристик, в первую очередь силового преобразователя, датчиков скорости и положения (перемещения);
- высокое быстродействие при аperiodическом характере переходных процессов разгона и торможения;
- высокое быстродействие при включении и сбросе нагрузки и при реверсе под нагрузкой;
- высокая равномерность движения при различной нагрузке на всех скоростях, вплоть до самых малых;
- удобство конструктивной установки двигателей и встройки силовых преобразователей и вспомогательных блоков управления в шкафы управления объектом в целом;
- малые габаритные размеры и расход активных, особенно дефицитных, материалов;
- высокая надежность и ремонтпригодность, существенная унификация узлов, простота наладки и эксплуатации;
- малая стоимость и энергоемкость.

Очевидно, что совмещение всех перечисленных требований в одном устройстве принципиально невозможно. Поэтому при проектировании и применении исполнительных механизмов в каждом конкретном случае удовлетворение одних требований достигается в ущерб другим. Это значит, что при создании ИМ должна решаться задача оптимизации с конкретными ограничениями, вытекающими из общих требований.

### **17.3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСТРОЙСТВАХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Подавляющее большинство электромеханических устройств составляют электромашинные устройства. Электромеханические устройства — это класс технических средств автоматизации и управления, в основе работы которых лежит электромеханическое преобразование энергии и сигналов.

В таких устройствах электромеханическое преобразование, как правило, сопровождается электромагнитным преобразованием энергии.

**Электромашинные устройства** — это подкласс технических средств, включающий в себя как классические электрические машины (двигатели, генераторы), так и специальные устройства, выполненные на базе электрической машины и предназначенные для различных функциональных преобразований в системах автоматического управления.

**Электрическая машина** — это электромеханический преобразователь энергии, состоящий из ряда взаимодействующих электромагнитных контуров, часть из которых неподвижна, а часть перемещается. Электрическая машина является обратимой, т. е. может работать в двух основных режимах: двигателя — преобразователя электрической энергии в механическую и генератора — преобразователя механической энергии в электрическую. Кроме этого, возможны специальные тормозные режимы работы электрической машины.

В большинстве электрических машин, в том числе в двигателях, перемещение контуров вращательное. Вращающиеся двигатели просты по конструкции и надёжны в эксплуатации. Однако если в технологическом оборудовании происходит поступательное движение, к двигателю подсоединяют механический преобразователь вращательного движения в поступательное. Это усложняет схему привода. Если сам двигатель будет преобразовывать электрическую энергию в механическую поступательного движения, то без механического преобразователя можно обойтись. Такие двигатели называют линейными.

По *выходной мощности* электрические машины можно разделить на следующие группы: микромашины — до 0,75 кВт, машины малой мощности — 0,75–10 кВт, машины средней мощности — от 10 кВт до сотен киловатт, машины большой мощности — более сотен киловатт.

По *частоте вращения* машины подразделяются на тихоходные — с частотой вращения до 300 об/мин, средней быстроходности — (300–1500) об/мин, быстроходные — (1500–6000) об/мин и сверхбыстроходные — свыше 6000 об/мин.

По *степени защиты от внешних воздействий* конструктивное выполнение электрических машин может быть защищенное, брызгозащищенное, каплезащищенное, водозащищенное, пылезащищенное, закрытое, герметичное и взрывозащищенное. Например, машины защищённого выполнения могут устанавливаться только в закрытых помещениях, т. к. не имеют защитных приспособлений от попадания дождя внутрь машины. В то же время герметичные машины выполняются с особо плотной изоляцией внутреннего пространства от окружающей среды и могут работать под водой или в газовых камерах.

По *способу охлаждения* различают машины с естественным и искусственным охлаждением. Охлаждение необходимо для предотвращения не-

допустимого нагрева, вызываемого потерями мощности в электрической машине. Электрические микромашины обычно охлаждаются за счёт естественного теплообмена с окружающей средой (естественное охлаждение). Машины большей мощности имеют искусственное охлаждение, в основном воздушное.

Классификация по функциональному признаку существенно связана с уровнем мощности машин. Среди электромашинных устройств исполнительных механизмов значительную долю составляют электрические микромашины. Поэтому в качестве примера рассмотрим функциональную классификацию микромашин, определяющую их назначение и области применения.

Электрические микромашины исполнительных механизмов (рис. 17.5) делятся на две подгруппы: 1) силовые микромашины, преобразующие электрический сигнал в механический; 2) информационные микромашины, преобразующие механический сигнал (угол поворота, угловую скорость и угловое ускорение) в электрический сигнал.

Силовые электрические микромашины — это в основном микродвигатели, работающие от сети трёхфазного и однофазного переменного тока или от сети постоянного тока.

Двигатели постоянного тока обладают хорошими регулировочными свойствами и высоким быстродействием, поэтому они успешно применяются в ИМ любой мощности с широким диапазоном регулирования скорости.

Трёхфазные асинхронные двигатели трудно поддаются плавному регулированию скорости. Поэтому они применялись в основном в ИМ с нерегулируемой или малорегулируемой скоростью. Однако в настоящее время в связи с появлением высокоэффективных полупроводниковых преобразователей частоты трёхфазные асинхронные двигатели все шире применяются в ИМ с регулируемой скоростью, причем и в диапазонах малой и средней мощности.

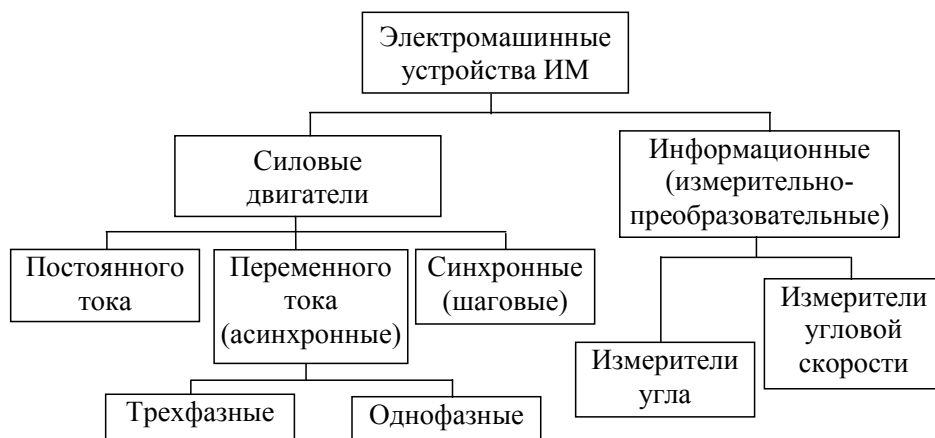


Рис. 17.5. Силовые электрические микромашины



Асинхронные микродвигатели с двухфазной обмоткой статора, питающиеся от однофазной сети, используются в качестве исполнительных элементов в механизмах микромощности как с нерегулируемой, так и с плавно регулируемой скоростью.

Синхронные шаговые двигатели применяются в позиционных и следящих ИМ, работающих в дискретном (шаговом) режиме. Шаговые двигатели наилучшим образом приспособлены для управления с помощью средств вычислительной техники.

К информационным микромашинам относятся измерители угла (поворотные трансформаторы, сельсины) и измерители угловой скорости (тахогенераторы). Эти микромашины широко используются в качестве измерительно-преобразовательных устройств в ИМ с обратными связями по положению и скорости.

#### **Группы основных требований, предъявляемых к электрическим микромашинам**

*Общие требования, не связанные с конкретными условиями эксплуатации и областью применения:* высокая точность преобразования и стабильность характеристик. Силовые микромашины наряду с достаточной точностью и быстродействием должны иметь хорошие энергетические показатели. Практически ко всем микромашинам предъявляется требование высокой надёжности, т. е. способности безотказно работать в течение заданного времени и при определённых условиях эксплуатации.

*Требования, предъявляемые в зависимости от области применения и условий эксплуатации:* минимальные габаритные размеры и масса при заданных выходных параметрах — для микромашин бортовой аппаратуры, подвижных частей промышленных роботов; устойчивость к вибрации и ударным нагрузкам — для транспортных и сельскохозяйственных машин, бортовой аппаратуры; климатическая и радиационная устойчивость — для микромашин, работающих в ядерных реакторах, на космических аппаратах и в условиях тропического климата; взрывобезопасность — для микромашин шахтного и рудничного оборудования; низкий уровень создаваемых шумов — для микромашин звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуры; низкий уровень излучаемых радиопомех — для микромашин, работающих в комплекте с электронной аппаратурой; низкий уровень газовыделений — для микромашин, применяемых в вакуумном технологическом оборудовании.

## **17.4. РЕГУЛИРУЮЩИЕ КЛАПАНЫ**

Регулирующий клапан — один из конструктивных видов регулирующей трубопроводной арматуры. Это наиболее часто применяющийся тип регулирующей арматуры как для непрерывного (аналогового), так и для дискретного регулирования расхода и давления. Выполнение этой задачи ре-

гулирующие клапаны осуществляют за счёт изменения расхода среды через своё проходное сечение.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации применяются различные виды управления регулирующей арматурой, чаще всего при этом используются специальные приводы и управление с помощью промышленных микроконтроллеров по команде от датчиков, фиксирующих параметры среды в трубопроводе. Используются электрические, пневматические, гидравлические и электромагнитные приводы для регулирующих клапанов, а также применяются запорно-регулирующие клапаны. С помощью этих устройств осуществляется как регулирование по заданной характеристике, так и уплотнение затвора по нормам герметичности для запорной арматуры, что обеспечивается специальной конструкцией плунжера, имеющего профильную часть для регулирования, а также уплотнительную поверхность для плотного контакта с седлом в положении «закрыто».

Для присоединения регулирующих клапанов к трубопроводам применяются все известные способы (фланцевый, муфтовый, штуцерный, цапковый, приваркой), но приварка к трубопроводу используется только для клапанов, изготовленных из сталей.

Большинство из регулирующих клапанов весьма схожи по конструкции с запорными клапанами, но есть и свои специфические виды.

По направлению потока рабочей среды регулирующие клапаны делятся:

- на проходные — такие клапаны устанавливаются на прямых участках трубопровода, в них направление потока рабочей среды не изменяется;
- угловые — меняют направление потока на 90°;
- трехходовые (смесительные) — имеют три патрубка для присоединения к трубопроводу (два входных и один выходной) для смешивания двух потоков сред с различными параметрами в один. В сантехнике такое устройство имеет название «смеситель».

Основные различия регулирующих клапанов заключаются в конструкциях регулирующих органов. Клапаны могут быть седельными, клеточными, мембранными, золотниковыми и гидравлическими.

#### **Седельные клапаны**

В седельных клапанах подвижным элементом служит плунжер, который может быть игольчатым, стержневым или тарельчатым. Плунжер перемещается вдоль оси потока среды через седло, изменяя проходное сечение. Наиболее часто встречаемые — двухседельные клапаны, так как их затвор хорошо уравновешен, что позволяет их применять для непрерывного регулирования давления до 6,3 МПа в трубопроводах диаметром до 300 мм, при этом используя исполнительные механизмы меньшей мощности, чем односедельные. Односедельные клапаны применяются чаще всего для не-

больших диаметров прохода из-за своего неуравновешенного плунжера. Также преимущество двухседельных клапанов состоит в том, что такой конструкцией гораздо легче обеспечить требуемую для запорно-регулирующей арматуры герметичность с помощью плунжера, имеющего специальный регулирующий профиль для контакта с одним седлом, а для посадки в другое седло — уплотнительную поверхность для более плотного контакта.

### **Клеточные клапаны**

Затвор клеточных клапанов выполняется в виде полого цилиндра, который перемещается внутри клетки, являющейся направляющим устройством и, одновременно, седлом в корпусе. В клетке имеются радиальные отверстия (перфорация), позволяющие регулировать расход среды. Ранее такие клапаны назывались поршневыми перфорированными. Клеточные клапаны за счёт своей конструкции позволяют снизить шум, вибрацию и кавитацию при работе арматуры.

### **Мембранные клапаны**

В клапанах этого типа используются встроенные или вынесенные мембранные пневмо- или гидроприводы. В случае встроенного привода расход рабочей среды напрямую изменяется за счёт перекрытия прохода в седле гибкой мембраной из резины, фторопласта или полиэтилена, на которую воздействует давление управляющей среды. Если привод вынесен, то перестановочное усилие передаётся через мембрану на опору штока клапана, а через него — на регулирующий орган; когда давление управляющей среды сбрасывается, пружина возвращает мембрану в начальное положение. Чтобы усилия от среды и сила трения в направляющих и уплотнении не приводили к снижению точности работы клапана, в такой арматуре часто используются дополнительные устройства — позиционеры, контролирующие положение штока. Мембранные клапаны могут быть как одно-, так и двухседельные. Достоинствами таких клапанов являются высокая герметичность подвижного соединения и коррозионная стойкость материалов, из которых изготавливаются мембраны, что позволяет обеспечить хорошую защиту внутренних поверхностей арматуры от воздействия рабочих сред, которые могут быть агрессивными.

### **Золотниковые клапаны**

В этих устройствах, в отличие от других клапанов с поступательным движением штока или мембраны, регулирование расхода среды происходит при повороте золотника на необходимый угол. Такие клапаны применяются, как правило, в энергетике и имеют альтернативное название «регулирующий кран», так как по принципу действия принадлежат к кранам.

**Гидроклапаны** (гидравлические клапаны) — это гидроаппараты, предназначенные для регулирования параметров потока жидкости путём изменения проходного сечения гидроаппарата за счёт изменения положения

запорно-регулирующего элемента под воздействием потока жидкости (непосредственно или опосредовано).

Различают гидроклапаны регулирующие и направляющие. Первые из них осуществляют регулирование давления в потоке жидкости, а вторые — пропускают или останавливают поток жидкости при достижении параметрами потока (давления, разности давлений и т. д.) заданных настройками клапана значений.

К *регулирующим гидроклапанам* относятся следующие:

- предохранительный клапан, поддерживающий давление не выше определённого уровня на входе в гидроклапан; в нормальном положении запорно-регулирующий элемент гидроклапана закрыт и открывается только тогда, когда давление на входе в гидроклапан достигнет предельнодопустимого значения (давление срабатывания);
- переливной клапан, поддерживающий давление на входе в клапан на заданном уровне; в нормальном положении переливной гидроклапан открыт и через него осуществляется постоянный слив части потока рабочей жидкости;
- редуциционный клапан, поддерживающий постоянным давление на выходе из клапана;
- клапан разности давлений, поддерживающий постоянную разность между давлениями на входе и выходе из клапана;
- клапан соотношения давлений, поддерживающий постоянным соотношение между давлениями на входе и выходе из клапана.

К *направляющим гидроклапанам* относятся следующие:

- обратный клапан, пропускающий поток жидкости только в одном направлении; функциональное отличие обратного клапана от предохранительного заключается в следующем: предохранительный срабатывает только в том случае, когда давление на входе достигает определённого уровня, а обратный клапан срабатывает при любом, даже самом минимальном превышении давления на входе над давлением на выходе из клапана; часто к обратным клапанам относятся гидрозамки;
- клапан последовательности, пропускающий поток жидкости в том случае, если давление на входе в клапан либо давление в некотором постороннем потоке достигает определённого значения;
- клапан выдержки времени, предназначенный для пропускания или остановки потока жидкости через определённый промежуток времени.

## 17.5. НАСОСЫ

Насос — гидравлическая машина, преобразующая механическую энергию приводного двигателя в энергию потока жидкости, служащая для перемещения и создания напора жидкостей всех видов, механической смеси жидкости с твердыми и коллоидными веществами или сжиженных газов.

### **Классификация насосов**

*По принципу действия и конструкции:*

- импеллерные (ламельные);
- пластинчатые (шиберные);
- шестерённые;
- аксиально-плунжерные;
- радиально-плунжерные;
- центробежно-шнековые (дисковые);
- винтовые (шнековые);
- поршневые;
- центробежные;
- осевые;
- вихревые;
- роторные;
- струйные;
- диафрагменные;
- перистальтические;
- мембранные;
- абсорбционные;
- тараны;
- магниторазрядные.

*По характеру сил, преобладающих в насосе:* объёмные, в которых преобладают силы давления, и динамические, в которых преобладают силы инерции.

*По характеру соединения рабочей камеры с входом и выходом из насоса:* периодическое соединение (объёмные насосы) и постоянное соединение входа и выхода (динамические насосы).

Объёмные насосы используются для перекачки вязких жидкостей. Это высоконапорные насосы, они чувствительны к загрязнению перекачиваемой жидкости. Рабочий процесс в объёмных насосах неуравновешен (высокая вибрация), поэтому необходимо создавать для них массивные фундаменты. Для этих насосов также характерна неравномерность подачи. Большим плюсом таких насосов можно считать способность к сухому всасыванию (самовсасыванию).

Для динамических насосов характерно двойное преобразование энергии (1-й этап: механическая  $\Rightarrow$  кинетическая + потенциальная; 2-й этап: кинетическая  $\Rightarrow$  потенциальная). В динамических насосах можно перекачивать загрязнённые жидкости, они обладают намного большей равномерностью подачи и большей уравновешенностью рабочего процесса. В отличие от объёмных насосов, они не способны к самовсасыванию.

### **Объёмные насосы**

Рабочий процесс объёмных насосов основан на попеременном заполнении рабочей камеры жидкостью и вытеснении её из рабочей камеры.

Ниже представлены некоторые виды объёмных насосов.

*Пластинчатые насосы* — по сравнению с другими видами объёмных гидромашин обеспечивают равномерное всасывание перекачиваемой жидкости; могут использоваться для дозирования и быть как регулируемыми, так и нерегулируемыми. В пластинчатых регулируемых насосах изменение подачи осуществляется за счёт изменения объёма рабочей камеры путём изменения эксцентриситета — величины смещения оси ротора относительно оси статора. В качестве регулирующего устройства применяются гидравлические и механические регуляторы.

*Винтовые насосы* — среди всех объёмных насосов обеспечивают наиболее равномерную подачу перекачиваемой жидкости, могут использоваться для дозирования. Конструкция таких насосов, как правило, включает в себя различные элементы автоматики, способные поддерживать давление на одном уровне и автоматически включать/выключать насос, когда резервуар с водой опустошается или переполняется.

*Поршневые насосы* могут создавать весьма высокое давление, плохо работают с абразивными жидкостями, могут использоваться для дозирования.

*Перистальтические насосы* создают невысокое давление, химически инертны, могут использоваться для дозирования.

*Мембранные насосы* — создают невысокое давление, могут использоваться для дозирования.

*Импеллерные (ламельные) насосы.* Могут быть изготовлены в пищевом, маслобензостойком и кислотощёлочестойком исполнении. Импеллерные насосы обеспечивают ламинарный поток перекачиваемого продукта на выходе из насоса и могут использоваться в качестве дозаторов.

Общие свойства объёмных насосов:

- цикличность рабочего процесса и связанные с ней порционность и пульсации подачи и давления, т. е. подача объёмного насоса осуществляется не равномерным потоком, а порциями;
- герметичность, т. е. постоянное отделение напорной гидролинии от всасывающей (лопастные насосы этим свойством не обладают, а являются проточными);
- самовсасывание, т. е. способность объёмных насосов создавать во всасывающей гидролинии вакуум, достаточный для подъёма жидкости вверх во всасывающей гидролинии до уровня расположения насоса (лопастные насосы не являются самовсасывающими);
- независимость давления, создаваемого в напорной гидролинии, от подачи жидкости насосом.

По виду движения вытеснителей объёмные насосы делятся на поршневые и роторные гидромашин.

### **Динамические насосы**

К классу динамических насосов относятся лопастные, центробежные, центробежно-шнековые, консольные, осевые, полуосевые, радиальные, вихревые, струйные, тараны.

*Лопастные насосы*, рабочим органом у которых служит лопастное колесо или мелкозаходный шнек. В них входят лопастные, центробежные, центробежно-шнековые, консольные, осевые, полуосевые, радиальные насосы.

*Центробежные насосы*, у которых преобразование механической энергии привода в потенциальную энергию потока происходит вследствие центробежных сил, возникающих при взаимодействии лопаток рабочего колеса с жидкостью. Центробежные насосы подразделяют на следующие виды:

- центробежно-шнековые насосы — вид центробежного насоса с подводом жидкости к рабочему органу, выполненному в виде мелкозаходного шнека большого диаметра (дисков), расположенному по центру, с выбросом по касательной вверх или вбок от корпуса;
- консольные насосы — с односторонним подводом жидкости к рабочему колесу, расположенному на конце вала, удаленном от привода;
- осевые насосы, рабочим органом которых служит лопастное колесо пропеллерного типа. Жидкость в этих насосах перемещается вдоль оси вращения колеса. Данные насосы с высоким коэффициентом быстроходности характеризуются большими значениями подач, но низкими значениями напора;
- полуосевые (диагональные, турбинные) насосы, рабочим органом которых служит полуосевое (диагональное, турбинное) лопастное колесо;
- радиальные насосы, рабочими органами которых служат радиальные рабочие колеса. Тихоходные одноступенчатые и многоступенчатые насосы с высокими значениями напора при низких значениях подач.

*Струйные насосы*, в которых перемещение жидкости осуществляется за счет энергии потока вспомогательной жидкости, пара или газа (нет подвижных частей, но низкий КПД).

*Тараны (гидротараны)*, использующие явление гидравлического удара для нагнетания жидкости (минимум подвижных частей, почти нет трущихся поверхностей, простота конструкции, способность развивать высокое давление на выходе, низкие КПД и производительность).

*Вихревые насосы* — отдельный тип лопастных насосов, в которых преобразование механической энергии в потенциальную энергию потока (напор) происходит за счет вихреобразования в рабочем канале насоса.

Вихревые насосы — динамические насосы, жидкость в которых перемещается по периферии рабочего колеса в тангенциальном направлении. Преобразование механической энергии привода в потенциальную энергию потока (напор) происходит за счет множественных вихрей, возбуждаемых лопастным колесом в рабочем канале насоса. КПД реальных насосов обычно не превышает 30 %.

Применение вихревого насоса оправдано при значении коэффициента быстроходности  $n_s < 40$ . Вихревые насосы в многоступенчатом исполнении значительно расширяют диапазон рабочих давлений при малых подачах, снижая коэффициент быстроходности до значений, характерных для насосов объемного типа.

Вихревые насосы сочетают преимущества насосов объемного типа (высокие давления при малых подачах) и динамических насосов (линейная зависимость напора насоса от подачи, равномерность потока).

Вихревые насосы используются для перекачки чистых и маловязких жидкостей, сжиженных газов, в качестве дренажных насосов для перекачки горячего конденсата.

Вихревые насосы обладают низкими кавитационными качествами. Кавитационный коэффициент быстроходности вихревых насосов  $C = 100\text{--}110$ .

В насосах Рутса два синхронно противоположно вращающихся ротора вращаются бесконтактно в одиночном корпусе.

*Классификация насосов по реализации:*

- механические;
- поршневые;
- роторно-поршневые;
- диафрагменные;
- пластинчатые;
- винтовые;
- вакуумные Рутса;
- золотниковые;
- спиральные;
- турбомолекулярные;
- магниторазрядные;
- струйные;
- водокольцевые;
- паромаслянные диффузионные;
- паромаслянные бустерные;
- сорбционные;
- криогенные.

*Классификация насосов по типу перекачиваемой среды*

По типу перекачиваемой среды различают насосы газовые, водяные, для перекачки пульпы и др. Особо следует выделить химические насосы.

**Химические насосы** предназначены для перекачки различных агрессивных жидкостей, поэтому основными областями их применения являются химическая и нефтехимическая промышленность (перекачивание кислот, щелочей, нефтепродуктов), лакокрасочная промышленность (краски, лаки, растворители и др.) и пищевая промышленность.



Химические насосы перекачивает кислоты и щелочи, органические продукты, сжиженные газы и т. п., которые характеризуются взрывоопасностью, различной температурой, токсичностью, склонностью к полимеризации и налипанию, содержанием растворенных газов. Характер перекачиваемых жидкостей обуславливает то, что химические насосы изготавливаются полностью из химостойких полимеров.

## 17.6. ВЕНТИЛЯТОРЫ

Вентилятор — устройство для перемещения газа со степенью сжатия менее 1,15 (или разностью давлений на выходе и входе не более 15 кПа).

### Типы вентиляторов

В общем случае вентилятор — это ротор с закрепленными определенным образом лопатками, которые при вращении ротора, сталкиваясь с воздухом, отбрасывают его. От положения и формы лопаток зависит направление, в котором отбрасывается воздух. Существует несколько основных видов *по типу конструкции* вентиляторов, используемых для перемещения воздуха:

- осевые (аксиальные);
- центробежные (радиальные);
- диаметральные (тангенциальные).

Вентиляторы обычно используются для перемещения воздуха — для вентиляции помещений, охлаждения оборудования, воздухообмена процесса горения (воздуходувки и дымососы). Мощные осевые вентиляторы могут использоваться как движители, поскольку отбрасываемый воздух, согласно третьему закону Ньютона, создает силу противодействия, действующую на ротор.

### Осевой (аксиальный) вентилятор

Данный вид вентилятора содержит лопасти (в некоторых случаях вместо понятия «лопасти» применяется понятие «лопатки»), перемещающие воздух вдоль оси, вокруг которой они вращаются. Вследствие совпадения направления движения всасываемого и нагнетаемого воздуха, а также, в большинстве случаев, простоты изготовления этот вид вентилятора является наиболее распространенным.

Примеры применения аксиальных вентиляторов: малые вентиляторы охлаждения электроники (кулеры), бытовые вентиляторы, вентиляторы для турбовентиляторных авиационных двигателей, вентиляторы аэродинамических труб.

### Центробежный (радиальный) вентилятор

Данный вид вентилятора имеет вращающийся ротор, состоящий из лопаток спиральной формы. Воздух через входное отверстие засасывается внутрь ротора, где он приобретает вращательное движение и, за счет центробежной силы и специальной формы лопаток, направляется в выходное

отверстие специального спирального кожуха. Таким образом, выходной поток воздуха находится под прямым углом к входному. Данный вид вентилятора широко применяется в промышленности.

Центробежные вентиляторы из алюминиевых сплавов (укомплектованные взрывозащитными электродвигателями по уровню защиты от искрообразования) относятся к вентиляторам с повышенной защитой, то есть к вентиляторам, в которых предусмотрены средства и меры, затрудняющие возникновение опасных искр. Вентиляторы предназначены для перемещения газо- и паровоздушных взрывоопасных смесей с температурой не выше 80 °С, не вызывающих ускоренной коррозии проточной части вентиляторов, не содержащих взрывчатых веществ, взрывоопасной пыли, липких и волокнистых материалов с запыленностью не более 10 мг/м<sup>3</sup>. Температура окружающей среды должна быть в пределах от –40 до +45 °С. Вентиляторы с повышенной защитой от искрообразования предназначены для перемещения газопаровоздушных смесей 1-й и 2-й категории групп Т1, Т2, Т3 по классификации ПЭУ.

#### **Вентилятор диаметрального сечения (тангенциальный)**

Данный вид вентиляторов имеет ротор типа «беличья клетка» (ротор пустой в центре и лопасти осевого вентилятора вдоль периферии) и обычно выполнен в форме продолговатого цилиндра. Вместо стенок у цилиндра крыльчатка из загнутых вперед лопастей. Крыльчатка тангенциального вентилятора встроена в корпус в форме диффузора, напоминающий корпус центробежного вентилятора, только воздух забирается не с торца вентилятора, а по всей его длине с фронтальной стороны устройства. Воздух увлекается вращающимися лопатками, а потом благодаря диффузору приобретает ускорение в нужном направлении. Таким образом, в тангенциальных (тангенциальных) вентиляторах воздух поступает вдоль периферии ротора и движется к выходу подобно тому, как это происходит в центробежном вентиляторе. Такие вентиляторы производят равномерный воздушный поток вдоль всей ширины вентилятора и бесшумны при работе. Они сравнительно громоздки, и воздушное давление низкое. Тангенциальные вентиляторы широко применяются в кондиционерах, воздушных завесах и других устройствах, где не важен напор воздуха. Отличительной особенностью тангенциальных вентиляторов можно назвать большой расход воздуха, низкий уровень шума и низкий создаваемый напор. Последняя особенность определяет невозможность осуществлять глубокую фильтрацию воздуха при помощи бытового кондиционера.

Вентиляторы также разделяют *по способу исполнения*:

- многозональные;
- канальные;
- крышные.

### **Многозональные вентиляторы**

Многозональные центробежные вытяжные вентиляторы имеют специальный корпус, позволяющий подключить несколько всасывающих воздуховодов, вытягивающих воздух из разных зон. Зоной может быть отдельный вентиляционный канал, комната или даже часть большого помещения. Такие вентиляторы незаменимы на объектах, где следует сделать вытяжку из нескольких мест, а канал для выброса воздуха всего один. Многозональные вытяжные вентиляторы позволяют оптимизировать сеть воздуховодов, сократить количество дорогих фасонных изделий, используя при этом однотипные гибкие воздуховоды.

### **Канальные вентиляторы (прямоточные)**

Предназначены для монтажа в вентиляционный канал круглого или прямоугольного сечения. Вентиляторы этого типа устанавливаются на одном валу с электродвигателем в едином корпусе с использованием виброизолирующих прокладок. Вентилятор может быть осевым, многолопастным или радиальным, с лопатками, загнутыми как вперед, так и назад, одностороннего или двустороннего всасывания. Корпус канальных вентиляторов может изготавливаться из специального пластика, из гальванизированной стали и даже быть смешанным. Из-за небольших габаритных размеров канальные вентиляторы могут устанавливаться непосредственно в сети воздуховодов, встраиваться в канальные системы вентиляции и кондиционирования воздуха и скрываться за подшивным потолком или в специальных вертикальных шкафах. Возможно любое (горизонтальное, вертикальное или наклонное) положение вентилятора при его установке. Основные преимущества канального вентилятора связаны с его компактностью при значительных расходах воздуха.

### **Крышные вентиляторы**

Эти вентиляторы монтируются непосредственно на крыше здания, обычно имеют специальную раму для обеспечения долговечности и стойкости к атмосферным воздействиям. В связи с тем, что они практически весь срок службы находятся на улице, к ним предъявляются особые требования по влаго- и пылеустойчивости. Обычно они выполняются из высококачественной стали с эпоксидным коррозионно-стойким покрытием либо гальванизированной. Существуют крышные вентиляторы как для систем общей вентиляции, так и специальные жаропрочные вентиляторы для высокотемпературных систем (например, организация вытяжки для камина или газового котла).

### **Конструкция вентиляторов**

Привод вентиляторов обычно электрический. Электрические вентиляторы состоят из набора вращающихся лопаток, которые размещены в защитном корпусе, позволяющем воздуху проходить через него. Лопасти вращаются электродвигателем. Для больших промышленных

вентиляторов используются трёхфазные или однофазные асинхронные двигатели. Меньшие вентиляторы часто приводятся в действие посредством электродвигателя переменного тока с экранированным полюсом, щётчными или бесщёточными двигателями постоянного тока. Вентиляторы с приводом от двигателей переменного тока обычно используют напряжение электросети. Вентиляторы с приводом от двигателя постоянного тока используют низкое напряжение, обычно 24, 12 или 5 В. В вентиляторах охлаждения для компьютерного оборудования используют исключительно бесщёточные двигатели постоянного тока, которые производят намного меньше электромагнитных помех при работе. В машинах, которые уже имеют двигатель, вентилятор часто соединяется непосредственно с ним — это можно видеть в автомобилях, в больших системах охлаждения и вентиляционных машинах. Также вентиляторы насажены на валы многих электродвигателей мощностью 1 кВт и более, протягивая через обмотки двигателя охлаждающий воздух, что называется самовентиляцией электродвигателя.

#### **Безопасные вентиляторы**

В 2009 году на рынок был выпущен безопасный вентилятор. Воздушный поток в нем формирует турбина, спрятанная в основании и подающая воздух сквозь узкие щели. Достоинство такой схемы — отсутствие доступных движущихся деталей, а недостаток — шумность.

## **17.7. РЕЛЕ**

Реле — электромагнитный аппарат (переключатель), предназначенный для коммутации электрических цепей (скачкообразного изменения выходных величин) при заданных изменениях электрических или неэлектрических входных величин. Широко используется в различных автоматических устройствах. Различают электрические, пневматические (температурные), механические виды реле, но наибольшее распространение получили электрические (электромагнитные) реле.

Основные части реле: электромагнит, якорь и переключатель. Электромагнит представляет собой электрический провод, намотанный на катушку с сердечником из магнитного материала. Якорь — пластина из магнитного материала, через толкатель управляющая контактами. При пропуске электрического тока через обмотку электромагнита возникающее магнитное поле притягивает к сердечнику якорь, который через толкатель смещает и тем самым переключает контакты. Переключатели могут быть замыкающими, размыкающими, переключающими.

Герконовые реле вместо сердечника используют геркон (герметичный контакт).

## Классификация реле

Реле классифицируются по различным признакам.

По *начальному состоянию контактов* выделяются реле:

- с нормально замкнутыми контактами;
- нормально разомкнутыми контактами;
- переключающимися контактами (бистабильное реле).

По *типу управляющего тока*:

- постоянного тока:
  - нейтральные реле — полярность управляющего сигнала не имеет значения, регистрируется только факт его присутствия/отсутствия (например, реле типа НМШ);

- поляризованные реле — чувствительны к полярности управляющего напряжения, переключаются при её смене (например, реле типа КШ);

- комбинированные реле — реагируют как на наличие/отсутствие управляющего сигнала, так и на его полярность (например, реле типа КМШ);
- переменного тока.

По *дополнительной механике и количеству управляемых контактов*:

- электромеханический счётчик с предустановкой;
- шаговой искатель.

По *напряжению и величине управляющего тока*:

- маломощные;
- средней мощности;
- мощные.

По *задержке срабатывания*:

- без предустановленной задержки (срабатывают так быстро, как могут);
- с задержкой (имеют специальную короткозамкнутую обмотку из одного витка толстой медной шины);
- «реле времени» (снабжены механическими узлами, позволяющими обеспечить очень высокую задержку — до десятков минут).

По *типу исполнения*:

- электромеханические;
- электромагнитные (обмотка электромагнита неподвижна относительно сердечника);
- магнитоэлектрические (обмотка электромагнита с контактами подвижна относительно сердечника);
- индукционные;
- полупроводниковые;
- термореле (биметаллические).

По *контролируемой величине*:

- реле напряжения;
- реле тока;

- реле мощности;
- реле направления мощности;
- реле сопротивления;
- фотореле (срабатывают от уровня освещенности);
- дифференциальные.

### **Особенности функционирования реле**

Управляемая цепь электрически никак не связана с управляющей (такая ситуация часто обозначается в электротехнике как сухой контакт). Более того, в управляемой цепи величина тока может быть намного больше, чем в управляющей, т. е. реле, по сути, играет роль дискретного усилителя тока, напряжения и мощности в электрической цепи. Это свойство реле, кстати, имело широкое применение в самых первых дискретных (цифровых) вычислительных машинах. Впоследствии реле в цифровой вычислительной технике были заменены сначала лампами, потом транзисторами и микросхемами, работающими в ключевом (переключательном) режиме. В настоящее время делаются попытки возродить релейные вычислительные машины с использованием нанотехнологий.

Другим важным свойством реле является возможность дистанционного управления различными объектами с помощью достаточно небольших токов и напряжений.

В электронике и электротехнике реле используют в основном для управления большими токами. В цепях с небольшими токами для управления чаще всего применяются транзисторы или тиристоры.

При работе со сверхбольшими токами (десятки-сотни ампер; например, при очистке металла методом электролиза) для исключения возможности пробоя контакты управляемой цепи исполняются с большой контактной площадью и погружаются в масло (так называемая «масляная ячейка»).

Реле до сих пор очень широко применяются в бытовой электротехнике, в особенности для автоматического включения и выключения электродвигателей (пускозащитные реле). Например, пускозащитное реле обязательно имеется в бытовом холодильнике, а также в стиральной машине. В этих устройствах реле намного надёжнее электроники, так как оно устойчиво к броску тока при запуске электродвигателя и, особенно, к сильному броску напряжения при его отключении.

## 18. ЗАЩИТА АППАРАТУРЫ

---

### 18.1. ЗАЩИТА АППАРАТУРЫ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**В**иды механических воздействий на РЭА. Все виды радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) подвергаются воздействию внешних механических нагрузок (вибрации, удары, ускорения, акустические шумы), которые передаются к каждой детали, входящей в конструкцию. Механические воздействия имеют место в работающей РЭА, если она установлена на подвижном объекте, или при транспортировке ее в нерабочем состоянии. Количество переданной энергии определяет уровень и характер изменения конструкции. Допустимые уровни механического изменения конструкции определяются ее прочностью и устойчивостью к механическим воздействиям.

Под *прочностью конструкции* понимается способность аппаратуры выполнять функции и сохранять параметры после приложения механических воздействий. *Устойчивость конструкции* — способность РЭА сохранять функции и параметры в процессе механических воздействий.

Откликом, или реакцией, конструкции на механические воздействия называют трансформацию и преобразование энергии механического возбуждения. К ним относятся механические напряжения в элементах конструкции, перемещения элементов конструкции и их соударения, деформации и разрушения конструктивных элементов, изменения свойств и параметров конструкции.

Механические воздействия могут приводить к взаимным перемещениям деталей и узлов, деформации крепежных, несущих и других элементов конструкций, их соударению. При незначительных механических воздействиях в элементах конструкций возникают упругие деформации, не сказывающиеся на работоспособности аппаратуры. Увеличение нагрузки приводит к появлению остаточной деформации и при определенных условиях — к разрушению конструкции. Разрушение может наступить и при нагрузках, много меньших предельных значений статической прочности материалов, если конструкция окажется подверженной знакопеременным нагрузкам.

Отказы аппаратуры бывают *восстанавливаемыми* после снятия или ослабления механического воздействия (изменение параметров компонентов, возникновение электрических шумов) и *невосстанавливаемыми* (обрывы и замыкания электрических соединений, отслаивание проводников печатных плат, нарушение элементов крепления и разрушение несущих конструкций).

На транспортируемую РЭА в процессе ее эксплуатации воздействуют вибрации, ударные нагрузки и линейные ускорения. *Гармонические вибрации* характеризуются частотой, амплитудой, ускорением. *Ударные нагрузки* характеризуются числом одиночных ударов или их серий (обычно оговаривают максимальное число ударов), длительностью ударного импульса и его формой, мгновенной скоростью при ударе, перемещением соударяющихся тел. *Линейные ускорения* характеризуются ускорением, длительностью, знаком воздействия ускорения.

Возникающие при вибрациях, ударах и ускорениях перегрузки оценивают соответствующими коэффициентами. Для уменьшения воздействия вибраций и ударов аппаратуру устанавливают на амортизаторы или применяют демпфирующие материалы.

Воздействие линейных ускорений эквивалентно увеличению массы аппаратуры и при значительной длительности требует увеличения прочности конструкции. Амортизаторы от линейных перегрузок практически не защищают.

Как показывает опыт эксплуатации транспортируемой РЭА, наибольшее разрушающее воздействие на конструкцию оказывают вибрации. Как правило, конструкция аппарата, выдержавшая воздействие вибрационных нагрузок в определенном частотном диапазоне, выдерживает ударные нагрузки и линейные ускорения с большими значениями соответствующих параметров.

**Понятия виброустойчивости и вибропрочности конструкции.** В отношении конструкции РЭА различают два понятия: вибрационная устойчивость и вибрационная прочность.

*Вибрационная устойчивость* — свойство объекта при заданной вибрации выполнять заданные функции и сохранять значения своих параметров в пределах нормы. *Вибрационная прочность* — прочность при заданной вибрации и после прекращения ее.

Воздействие транспортной тряски складывается из ударов и вибраций. Введение амортизаторов между РЭА и объектом в качестве среды, уменьшающей амплитуду передаваемых колебаний и ударов, снижает действующие на РЭА механические силы, но не уничтожает их полностью. В некоторых случаях образованная с введением амортизаторов резонансная система влечет за собой возникновение низкочастотного механического резонанса, который приводит к увеличению амплитуды колебаний РЭА.



**Понятия жесткости и механической прочности конструкции.** При разработке конструкции РЭА необходимо обеспечить требуемую жесткость и механическую прочность ее элементов.

*Жесткость конструкции* есть отношение действующей силы к деформации конструкции, вызванной этой силой. Под *прочностью конструкции* понимают нагрузку, которую может выдержать конструкция без остаточной деформации или разрушения. Повышение прочности конструкции РЭА связано с усилением ее конструктивной основы, применением ребер жесткости, контровки болтовых соединений и т. д. Особое значение имеет повышение прочности несущих конструкций и входящих в них узлов методами заливки и обволакивания. Заливка пеноматериалом позволяет сделать узел монолитным при незначительном увеличении массы.

**Конструкция как колебательная система.** Во всех случаях нельзя допускать образования механической колебательной системы. Это касается крепления монтажных проводов, микросхем, экранов и других частей, входящих в РЭА.

Основными параметрами любой конструкции с позиций реакции на механические воздействия являются масса, жесткость и механическое сопротивление (демпфирование). При анализе влияния вибраций на конструкции модулей последние представляют в виде системы с сосредоточенными параметрами, в которой заданы масса изделия  $m$ , элемент жесткости в виде пружины и элемент механического сопротивления в виде демпфера, характеризующиеся параметрами  $k$  и  $r$  соответственно. Если частота собственных колебаний системы близка к частоте вынужденных, в колебательной системе возникает явление механического резонанса, что может привести к повреждению конструкции.

**Амортизация конструкции РЭА.** Один из эффективных методов повышения устойчивости конструкции, как транспортируемой, так и стационарной, к воздействию вибраций, а также ударных и линейных нагрузок — использование амортизаторов. Действие амортизаторов основано на демпфировании резонансных частот, т. е. поглощении части колебательной энергии.

Эффективность амортизации характеризуется коэффициентом динамичности или передачи, числовое значение которого зависит от отношения частоты действующих вибраций к частоте амортизированной системы.

При разработке схемы амортизации необходимо стремиться к тому, чтобы система имела минимальное число собственных частот и чтобы они были в 2–3 раза ниже наименьшей частоты возмущающей силы.

Для амортизированной аппаратуры следует как можно больше уменьшать собственную частоту, а для неамортизированной, напротив, увеличивать, приближая ее к верхней границе возмущающих воздействий или превышая ее.

## 18.2. ЗАЩИТА АППАРАТУРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ

Надежность и достоверность работы РЭА и систем зависят от их помехозащищенности по отношению к внешним и внутренним, случайным и регулярным помехам. От правильного решения задачи обеспечения помехоустойчивости элементов и узлов РЭА зависят как сроки разработки изготовления и наладки РЭА, так и нормальное ее функционирование в процессе эксплуатации.

**Природа помех.** Помехой для аппаратуры является внешнее или внутреннее воздействие, приводящее к искажению аналоговой или дискретной информации в изделии во время ее хранения, преобразования, обработки или передачи. Помеха — непредусмотренный при проектировании РЭА сигнал, способный нарушить ее функционирование. Так как сигналы в РЭА имеют электрическую природу, то при конструировании необходимо учитывать помехи той же природы как наиболее вероятные источники искажения информации. Помехами могут быть напряжения, токи, электрические заряды, напряженность поля и др. Источники помех многообразны по физической природе и подразделяются на внутренние и внешние.

Внутренние помехи возникают внутри работающей аппаратуры. Источниками электрических помех являются в основном блоки питания и токо-разводящие цепи. Источниками магнитных помех являются трансформаторы и дроссели. При наличии пульсаций выходного напряжения вторичных источников электропитания тактирующие и синхронизирующие цепи, а также цепи распределения электроэнергии следует рассматривать как источники электромагнитных помех. Значительные помехи создают электромагниты, электрические двигатели, реле и электромеханические устройства. Внутренними помехами являются также помехи от рассогласования волновых сопротивлений линий связи с входными и выходными сопротивлениями модулей, которые эти линии соединяют, а также помехи, возникающие по земляным шинам.

Под внешними помехами понимаются помехи сети электропитания, сварочных аппаратов, щеточных двигателей, передающей радиоэлектронной аппаратуры и пр., а также помехи, вызванные разрядами статического электричества и атмосферными явлениями. Действие на аппаратуру внешних помех по физической природе аналогично действию внутренних помех.

Приемниками помех являются высокочувствительные усилители, линии связи, магнитные элементы. Помехи проникают в аппаратуру непосредственно по проводам или проводникам (гальваническая помеха), через электрическое (емкостная помеха), магнитное (индуктивная поме-

ха) или электромагнитное поле. Многочисленные проводники, входящие в состав любой аппаратуры, можно рассматривать как приемопередающие антенные устройства, принимающие или излучающие электромагнитные поля.

Гальваническая связь возникает в результате протекания токов и падения напряжений на электрических соединениях, общих по цепям питания. Поэтому проводники, объединяющие модули в единую систему, должны быть по возможности короткими, а их поперечные сечения — возможно большими, что приводит к уменьшению активного сопротивления и индуктивности проводов. Радикальным способом устранения гальванической помехи является устранение цепей, по которым проходят совместные токи питания и земли как чувствительных к помехам схем, так и сравнительно мощных схем.

Борьба с помехами приобретает все большую актуальность по следующим причинам:

- энергетический уровень информационных сигналов имеет тенденцию к уменьшению, а энергетический уровень внешних помех непрерывно увеличивается;
- увеличение взаимного влияния элементов из-за уменьшения габаритных размеров активных элементов и линий связи между ними, а также увеличение плотности их размещения;
- возрастание уровня помех из-за усложнения систем и расширения применения внешних устройств с большим количеством электромеханических узлов;
- внедрение РЭА во все сферы человеческой деятельности.

**Классификация помех.** Помехи могут быть классифицированы по причине наведения, характеру проявления и пути распространения (рис. 18.1).

Основные причины, вызывающие искажения сигналов при прохождении их по цепям РЭА:

- а) отражения от несогласованных нагрузок и от различных неоднородностей в линиях связи;
- б) ухудшение фронтов и задержки, возникающие при включении нагрузок с реактивными составляющими;
- в) задержки в линии, вызванные конечной скоростью распространения сигнала;
- г) перекрестные помехи;
- д) паразитная связь между элементами через цепи питания и заземления;
- е) наводки от внешних электромагнитных полей.

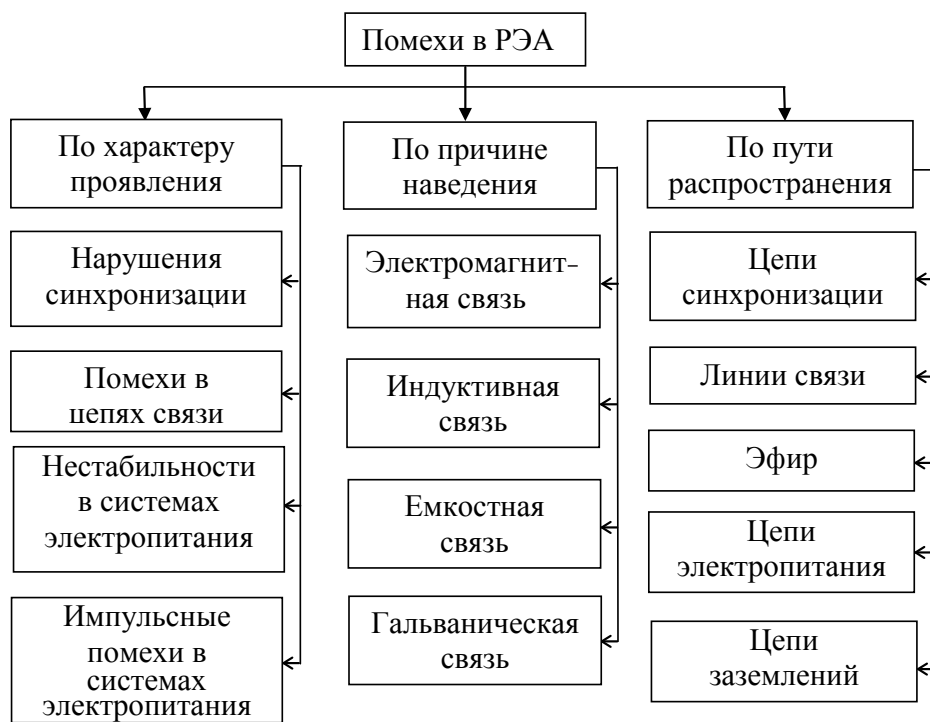


Рис. 18.1. Классификация помех

Степень влияния каждого из перечисленных факторов на искажение сигналов зависит от характеристик линий связи, логических элементов и сигналов, а также от конструктивного выполнения всей системы элементов и связей.

**Способы снижения помех.** Электрическое объединение логических и других элементов РЭА осуществляют связями двух видов: сигнальными и цепями питания. По сигнальным связям информация передается в виде импульсов напряжения и тока. Шины питания служат для подведения энергии к элементам от низковольтных источников постоянного напряжения.

**Помехи в сигнальных проводниках.** Связи между элементами РЭА выполняются различными способами: для сравнительно медленных устройств — в виде печатных или навесных проводников; в устройствах с повышенными скоростями работы — в виде печатных полосковых линий, «витых пар» (бифиляров).

При группировке элементов по узлам и блокам между ними образуется большое число электрически коротких и электрически длинных связей.

*Электрически короткой* называют *линию связи*, время распространения сигнала в которой много меньше переднего фронта передаваемого по ли-

нии импульса. Сигнал, отраженный от несогласованных нагрузок в этой линии связи, достигает источника раньше, чем успеет измениться входной импульс. Свойства такой линии можно описать сосредоточенными сопротивлениями, емкостью и индуктивностью.

*Электрически длинная линия связи* характеризуется временем распространения сигнала, много большим фронта импульса. В этой линии отраженный от конца линии сигнал приходит к ее началу после окончания фронта импульса и искажает его форму. Такие линии следует рассматривать как линии с распределенными параметрами.

В ИС, ячейках и модулях связи, как правило, электрически короткие линии. В более крупных конструктивных единицах РЭА — в основном электрически длинные линии. Доля длинных связей с ростом сложности аппаратуры возрастает.

### **Помехи в коротких связях**

С уменьшением геометрических размеров элементов и повышением плотности их размещения между сигнальными проводниками возникают емкостная и индуктивная связи, которые также можно представить как связи через взаимную емкость и взаимную индуктивность. При переключении элементов по сигнальным цепям протекают импульсные токи с крутыми фронтами, которые вследствие наличия паразитных связей наводят на соседних сигнальных проводниках помехи. При этом емкостная наводка изменяет потенциал всей линии связи, а индуктивная создает разность потенциалов между входом и выходом линии. Для снижения взаимных наводок необходимо уменьшать выходное сопротивление элементов, амплитуды токов, длину связей и их сечения, расстояние между линиями связи, применять изоляционные материалы с хорошими диэлектрическими свойствами.

### **Помехи при соединении элементов длинными связями**

Если линия с волновым сопротивлением нагружена на сопротивление, равное волновому, то такую линию называют согласованной, если нет, линию называют несогласованной. При этом волна напряжения, достигнув конца линии, отражается от него. Процесс поочередного отражения волны напряжения от обоих концов линии связи идет с затуханием и продолжается до тех пор, пока амплитуда отраженной волны не уменьшится до нуля. Отраженные волны напряжения накладываются на падающие, и, в итоге, форма входного напряжения может существенно исказиться. Аналогичные явления происходят и с волной тока. Отражения волн напряжения и тока могут быть не только от несогласованных нагрузок на концах линии, но и от различных неоднородностей в ней самой.

Рассмотренные процессы могут вызывать выбросы напряжения. Для уменьшения влияния выброса на параметры нагруженных схем в качестве нагрузки используют диоды Шоттки как динамические нелинейные сопро-

тивления. В результате энергия выбросов поглощается, что ведет к повышению устойчивости работы схем.

**Паразитные наводки в длинных линиях связи.** Если линии связи между элементами не экранированы, то электромагнитные поля, возникающие при прохождении по ним импульсных высокочастотных сигналов, не локализованы и в той или иной степени взаимодействуют между собой. При этом на линиях-приемниках возникают паразитные сигналы, форма и амплитуда которых зависят от характеристик линии-приемника и линии-индуктора, величины их связи между собой, параметров передаваемых сигналов и степени рассогласования самих линий.

**Методы разводки длинных линий связи.** В быстродействующих системах, в которых задержка определяется только задержками в цепях связей, основную проблему может составить способ разводки линий между отдельными ИС. В настоящее время существует три способа разводки: радиальный, с промежуточными отводами, комбинированный.

При *радиальном способе* разводки каждую ИС-нагрузку подключают к ИС-источнику сигнала индивидуальной связью, при этом ИС-источник сигнала должен иметь выходное сопротивление, равное  $z_0/n$ , где  $n$  — число нагруженных на нее ИС. При большом  $n$  потребуется ИС-источник сигнала с недостижимо малым выходным сопротивлением. Другой недостаток радиального способа — необходимость наличия отдельной линии связи для каждой нагрузки. Поэтому радиальный метод рекомендуют только для небольшого количества нагрузок.

При *способе разводки с промежуточными отводами* ИС-нагрузки подключают к связи-магистрالي и далее к ИС-источнику сигнала через короткие проводники, при этом нагрузочные ИС должны иметь высокие входные сопротивления, иначе они будут перегружать линии связи.

*Комбинированный способ* обеспечивает согласование в любой точке линии связи путем разводки сигналов на нагрузки, размещенные по разным направлениям. При этом число проводников меньше, чем при радиальном способе, а выходное сопротивление источника сигналов допускается сравнительно высоким. Если на линии связи находятся всего две нагрузки, то ИС-источник сигнала можно пометить в любой точке вдоль нее.

**Наводки по цепям питания и методы их уменьшения.** При использовании одного источника напряжения питание к элементам подводится с помощью двух проводников: прямого и обратного. Часто на элементы необходимо подавать напряжение от нескольких источников с разными номиналами. В этом случае для уменьшения количества шин питания обратные проводники объединяют в одну шину, которую соединяют с корпусом изделия и называют шиной *земля*. В статическом состоянии по цепям питания протекают стационарные токи.

При работе блоков и устройств РЭА, когда происходит выключение одних элементов и включение других, ток потребления по шинам питания изменяется, что приводит к нежелательным падениям напряжения и паразитным наводкам. В больших системах изменение тока в шине питания вследствие переключения элементов незначительно, так как в любой момент времени число включенных элементов примерно одинаково.

В шинах питания, подводящих энергию к более мелким устройствам, переключение элементов может приводить к значительному изменению тока потребления от источника напряжения. Так как шины питания имеют паразитную емкостную и индуктивную связь с сигнальными шинами, то при переключении элементов на сигнальных связях наводятся сравнительно большие помехи. При определенных условиях эти помехи могут вызвать ложное срабатывание схем. Кроме того, изменение тока в шине питания приводит к возникновению в ней переходного процесса. Переходный процесс приводит к колебанию напряжения, приложенного к элементам, что может изменять режим их работы и параметры выходных сигналов.

Для уменьшения наводок, связанных с падением напряжения на шинах питания и *земля* и переходными процессами в них, используют различные методы.

**Применение индивидуальных сглаживающих конденсаторов (ИСК).** ИСК устанавливают между шинами питания и *земля* непосредственно возле точек присоединения электронных устройств к этим шинам. ИСК является как бы индивидуальным источником питания схемы, максимально приближенным к ней физически. В микроэлектронной аппаратуре используются два вида ИСК, устанавливаемые непосредственно у каждой микросхемы или на группу микросхем в пределах одной ячейки, модуля.

Первый тип ИСК предназначен для сглаживания импульсных помех в момент переключения микросхемы за счет локализации цепи протекания бросков тока в цепи «микросхема — ИСК». В качестве таких ИСК используют обычно обладающие малой собственной индуктивностью керамические конденсаторы. Емкость ИСК выбирают, исходя из условия равенства заряда, накапливаемого конденсатором за время переключения микросхемы, заряду, переносимому выбросом тока за время переключения элемента.

Второй тип ИСК, устанавливаемый на группу микросхем, предназначен для компенсации бросков тока в системе электропитания. Это обычно электролитические конденсаторы большой емкости, обеспечивающие исключение резонансных явлений в цепях питания.

**Уменьшение общих участков протекания токов элементов по шинам питания.** Этот метод заключается в установке дополнительных перемычек в шинах питания и *земля*, которые уменьшают длину общих участков протекания токов элементов.

**Использование металлического листа в качестве «земли».** Этот метод применим для элементов второго уровня конструктивной иерархии РЭА (суб-

блоков, блоков, панелей) и заключается в установке в эти конструктивные элементы сравнительно толстого металлического листа, к которому припаивают обратные провода от всех закрепленных ячеек или модулей.

**Использование сплошных металлических прокладок в качестве шин питания.** Этот метод применим в случае использования многослойных печатных плат для устройств сверхбыстродействующих РЭА. В таких платах отдельные слои изготавливают с максимально большой площадью металла и применяют их в качестве шин питания; эти слои размещают внутри многослойной платы. При использовании сплошных металлических слоев значительно уменьшаются общие участки протекания токов различных элементов, собственное индуктивное сопротивление шин питания и увеличивается взаимная емкость между шинами питания.

**Помехоподавляющие фильтры.** Эффективным схемным средством ослабления внешних помех по сетям питания является использование помехоподавляющих фильтров. Фильтры характеризуются частотой среза и коэффициентом фильтрации, равным отношению сигнала на входе и выходе фильтра. Зная спектр частот полезного сигнала и помехи и задаваясь определенным ослаблением помехи (в идеале — до нуля), проектируют соответствующие схемы фильтров.

Сетевые фильтры предназначены передавать на выход (в прибор) только частоту сетевого напряжения и подавлять помехи от источника электропитания. Для защиты аппаратуры от перенапряжений в схему сетевого фильтра обычно вводят газоразрядники, варисторы, стабилитроны, предохранители.

**Применение экранов в РЭА.** При прохождении мощных сигналов по цепям связи последние становятся источниками электромагнитных полей, которые, пересекая другие цепи связи, могут наводить в них дополнительные помехи. Источниками электромагнитных помех могут быть также мощные промышленные установки, транспортные коммуникации, двигатели и т. д. Устройства, чувствительные к статическим магнитным полям (например, магнитные элементы с разомкнутым магнитопроводом), могут неустойчиво работать даже от таких слабых полей, как магнитное поле Земли.

Экраны включают в конструкцию для ослабления нежелательного возмущающего поля в некотором ограниченном объеме до приемлемого уровня или для локализации, где это возможно, действия источника полей. Возможны два варианта защиты. В первом случае экранируемая аппаратура размещается внутри экрана, а источник помех — вне его, во втором — экранируется источник помех, а защищаемая от помех аппаратура располагается вне экрана. Первый вариант обычно используют при защите от внешних помех, второй — внутренних.

В РЭА функции экранов чаще всего выполняют кожухи, панели и крышки приборов блоков и стоек, при выборе материалов и расчете толщины



которых, кроме соображений эффективности экранирования, необходимо учитывать требования обеспечения механической прочности, жесткости, надежности соединения отдельных элементов.

Отверстия и щели в экранах уменьшают эффективность экранирования, поэтому их необходимо исключать или сводить к минимуму. Однако полностью от них избавиться невозможно. Отверстия вводятся в кожух для установки соединителей, элементов управления, индикации, обеспечения нормального теплового режима. Эффективность экрана не ухудшится, если в его конструкции выполнены отверстия, максимальные размеры которых не превышают  $1/2$  минимальной длины волны экранируемого сигнала. Чтобы помеха не проникала через вентиляционные отверстия, на внутренних поверхностях кожухов с отверстиями может закрепляться металлическая сетка.

По принципу действия различают электростатическое, магнитостатическое и электромагнитное экранирование.

*Электростатическое экранирование* применяется при внутренних помехах с одних функциональных модулей аппаратуры на другие. При введении между модулями заземленного экрана высокой проводимости источник помех окажется подсоединенным на *землю* через паразитную емкость, желательно как можно большую, а входы и выходы схем — на соответствующие паразитные емкости (обычно много меньшие), что должно учитываться схемотехником при оценке параметров и характеристик схемы. Экранирующий эффект заключается в шунтировании на корпус большей части паразитной емкости, имеющейся между источником и приемником наводок.

В качестве экранов могут служить детали шасси и каркасов, обшивки стоек, панелей, субблоков, кассет, специальные листовые металлические прокладки на монтажной стороне плат, блоков, субблоков и т. д.

В целях улучшения экранировки особо чувствительных к помехам цепей (например, для передачи синхроимпульсов) на обеих сторонах печатных плат сигнальные и заземленные экранные проводники чередуют таким образом, чтобы против сигнальной линии, проходящей с одной стороны платы, всегда располагалась заземленная линия с другой стороны платы. При этом каждая сигнальная линия оказывается окруженной тремя заземленными линиями, в результате чего достигается не только эффективная экранировка сигнальной линии от внешних помех, но и для полезного сигнала обеспечивается подобная волноводу цепь от источника до нагрузки.

Экранирование применяется также для проводов входной и выходной линий, при этом чаще всего оказывается достаточным экранировать только входную цепь. Для устранения гальванической помехи по *земле* экраны проводов необходимо заземлять в одной точке. При выполнении линий передачи печатным способом вводятся экранирующие трассы, коммутируемые с шиной нулевого потенциала и выполняющие функции экранов проводов.

**Магнитостатическое экранирование.** Задача экранирования сводится к уменьшению или полному устранению индуктивной связи между источником и приемником помехи. Если магнитный поток пересекает контур, образуемый проводником, то в контуре наводится помеха. Для полного устранения или уменьшения напряжения помехи, наводимой в контуре, необходимо:

- поместить контур в экран;
- ориентировать его так, чтобы магнитные силовые линии поля не пересекали контур, а проходили вдоль него;
- уменьшить площадь контура.

Магнитные экраны выполняют как из ферромагнитных, так и немагнитных металлов. Ферромагнитные материалы с большой магнитной проницаемостью обладают малым магнитным сопротивлением, в результате чего линии магнитного поля будут шунтированы материалом экрана и пространство внутри экрана не будет подвергаться воздействию магнитного поля. Магнитное экранирование тем эффективнее, чем больше магнитная проницаемость экрана и толще экран. При выборе материала экрана необходимо помнить, что магнитная проницаемость с увеличением частоты поля уменьшается, и это сказывается на эффективности экранирования. Ферромагнитные материалы эффективно защищают аппаратуру в диапазоне частот 0–10 кГц.

Действие экрана из немагнитного металла основано на вытеснении внешнего магнитного поля из внутреннего пространства прибора материалом экрана. Внешнее переменное магнитное поле создает индукционные вихревые токи в экране, магнитное поле которых направлено навстречу внешнему полю внутри экрана. У экранов из немагнитных металлов эффективность экранирования повышается с увеличением толщины и проводимости материала экрана. Магнитное поле частотой выше 10 МГц достаточно надежно экранируется, если на диэлектрический кожух наносится медное или серебряное покрытие толщиной не более 100 мкм. Толщина немагнитного экрана может в несколько раз превысить толщину ферромагнитного, обеспечивающего на фиксированной частоте одинаковое ослабление. Использование ферромагнитного материала позволяет значительно снизить массу экрана. При экранировании магнитного поля заземление экрана не обязательно, поскольку оно не влияет на качество экранирования.

Однако перед тем как конструировать экран, необходимо предусмотреть все меры, чтобы избавиться от помехи более простым и дешевым способом. Например, уменьшение площади контура, пересекаемого силовыми линиями магнитного поля, получают укладыванием сигнальных проводников непосредственно по заземленным монтажным панелям модулей.

*Электромагнитное экранирование* охватывает диапазон частот от 1 кГц до 1 ГГц. Действие электромагнитного экрана основано на отражении электромагнитной энергии на границах диэлектрик-экран и ее затухании в тол-

ще экрана. Затухание в экране объясняется тепловыми потерями на вихревые токи в материале экрана, отражение — несоответствием волновых параметров материала экрана и окружающей среды. Для нижней границы частотного диапазона первостепенное значение приобретает отражение, для верхней границы — поглощение электромагнитной энергии.

Электромагнитное экранирование выполняется как немагнитными, так и магнитными металлами. Немагнитные металлы высокой проводимости можно эффективно использовать в низкочастотной части спектра, ферромагнитные материалы высокой магнитной проницаемости и электрической проводимости — во всем частотном диапазоне электромагнитного поля. Толщина экрана должна быть по возможности наибольшей. Для частот менее 1 МГц хорошие результаты дают медные и алюминиевые экраны, а при частотах выше 1 МГц — экраны из стали. Однако наилучшие результаты можно получить при применении многослойных экранов — последовательно чередующихся слоев магнитных и немагнитных металлов. Возможны различные варианты материалов следующих слоев: медь — пермаллой — медь, пермаллой — медь, медь — сталь — медь и другие. Введение воздушных промежутков между слоями (20–40 % суммарной толщины экрана) улучшит эффективность экранирования. При защите аппаратуры от внешнего поля материал с низкой магнитной проницаемостью помещают наружу, с высокой — внутрь. Если экран защищает источник электромагнитного поля, то материал с низкой магнитной проницаемостью должен быть внутренним слоем, а с высокой — наружным.

*Немагнитные материалы экранов.* Из немагнитных материалов с позиций минимальной стоимости и массы наилучшими свойствами обладает магний, но он легко корродирует, а образующийся слой окисла ухудшает контакт экрана с корпусом изделия. Цинк дешевле меди, имеет меньшую плотность, но мягок. Латунь по своим параметрам занимает среднее положение в ряду материалов, но благодаря отличным антикоррозионным свойствам и стабильности сопротивления электрического контакта ее можно рекомендовать для широкого применения в качестве материала экрана.

*Ферромагнитные материалы экранов.* В РЭА получили распространение экраны из стали и пермаллоев. Стальные экраны с малой начальной магнитной проницаемостью обеспечивают малое, но постоянное экранирование как на низких, так и на частотах вплоть до десяти килогерц. Экраны из пермаллоев с высокой начальной проницаемостью позволяют получить эффективное экранирование, но в узком диапазоне частот от нуля до нескольких сотен герц. С увеличением частоты возрастают вихревые токи экрана, которые вытесняют магнитное поле из толщи экрана и уменьшают его магнитную проводимость, а это сказывается на эффективности экранирования.

Широкое распространение в технике РЭА нашли также экранированные провода, коаксиальные кабели и «витые» пары проводников (бифиляры).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

---

1. Николайчук О. И. Современные средства автоматизации / О. И. Николайчук. М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2007. 256 с.
2. Шандров Б. В. Технические средства автоматизации: учебник для студентов вузов / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков. М. : Академия, 2007. 368 с.
3. Николайчук О. И. Системы малой автоматизации / О. И. Николайчук. М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2003. 256 с.
4. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов / Е. П. Угрюмов. 2-е изд. СПб. : ВНУ-Санкт-Петербург, 2010. 816 с.
5. Родионов В. Д. Технические средства АСУ ТП / В. Д. Родионов, В. А. Терехов, В. Б. Яковлев. М. : Высшая школа, 1989.
6. Справочник проектировщика АСУ ТП / под ред. Г. Л. Смилянско-го. М. : Машиностроение, 1983.
7. Мячев А. А. Интерфейсы вычислительных систем на базе мини-и микро-ЭВМ / А. А. Мячев, В. В. Иванов. М. : Радио и связь, 1986.
8. Поляков Л. В. Отображение измерительной информации / Л. В. Поляков, В. М. Лейн. Л. : Энергия, 1978.
9. Промышленные приборы и средства автоматизации: справ. пособие / В. В. Черенков [и др.]; под ред. В. В. Черенкова. Л. : Машиностроение, 1987.
10. Пей Ан. Сопряжение ПК с внешними устройствами: пер. с англ. / Ан Пей. М. : ДМК Пресс, 2003.
11. Разработка и оформление конструкторской документации радио-электронной аппаратуры: справочник / Э. Т. Романычева [и др.]; под ред. Э. Т. Романычевой. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1989. 448 с.
12. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов. М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 528 с.
13. Проектирование радиоэлектронной геофизической аппаратуры. Режим доступа: <http://geoin.org/design/index.html>. Загл. с экрана.
14. Системный анализ как основа проектирования информационных систем (часть 1). Режим доступа: <http://www.hbc.ru/news/analytics/217.html>. Загл. с экрана.
15. Автоматизированная система управления. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. Загл. с экрана.

16. Программно-технические средства оперативно-диспетчерского управления «ТС/ПТС ОДУ». Режим доступа: [http://www.niiis.nnov.ru/wps/wcm/connect/niiis/site/production/ptsAscTpNps/pts\\_odu/](http://www.niiis.nnov.ru/wps/wcm/connect/niiis/site/production/ptsAscTpNps/pts_odu/). Загл. с экрана.

17. Готовые решения. Режим доступа: <http://www.krug2000.ru/decisions.html>. Загл. с экрана.

18. Система диспетчерского управления сбора данных (SCADA-система). Режим доступа: <http://www.mka.ru/?p=41524>. Загл. с экрана.

19. Системы промышленной автоматизации с планшетными интерфейсами. Режим доступа: <http://www.rtsoft.ru/press/articles/details.php?id=2457>. Загл. с экрана.

20. Автоматизация. Режим доступа: <http://www.siemens.com/answers/ru/ru/#931760>. Загл. с экрана.

21. Датчики для измерения и автоматизации. Режим доступа: <http://www.sensor.ru>. Загл. с экрана.

22. Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.owen.ru>. Загл. с экрана.

23. Датчики давления. Режим доступа: <http://www.megasensor.com/category/davlenie>. Загл. с экрана.

24. Датчики температуры. Режим доступа: <http://www.megasensor.com/category/temperatura>. Загл. с экрана.

25. Датчики уровня. Режим доступа: <http://www.megasensor.com/category/uroven-zhidkosti-i-sypuchih>. Загл. с экрана.

26. Журнал «Компоненты и технологии». Режим доступа: <http://www.kit-e.ru>. Загл. с экрана.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	5
2. СТРУКТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	12
2.1. Назначение, цели и функции САУ .....	12
2.2. Классы САУ .....	13
2.3. Автоматизированные системы управления технологическими процессами .....	16
2.4. Структуры распределенных АСУ ТП .....	20
3. ТИПОВОЙ СОСТАВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ САУ .....	24
4. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРИБОРОВ (ГСП) .....	26
5. УСТРОЙСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОБЪЕКТЕ. ДАТЧИКИ.....	28
6. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ .....	32
6.1. Классификация по виду входной величины .....	32
6.2. Классификация по виду выходной величины .....	35
6.3. Классификация по принципу действия.....	36
7. ПРИМЕРЫ ДАТЧИКОВ .....	44
7.1. Датчики температуры .....	44
7.1.1. Кремниевые датчики температуры .....	44
7.1.2. Биметаллические датчики температуры .....	45
7.1.3. Термоиндикаторы .....	47
7.1.4. Термопреобразователи сопротивления.....	47
7.1.5. Инфракрасные датчики (пирометры) .....	48
7.2. Оптоволоконные датчики .....	50
7.2.1. Фазовая оптоволоконная технология .....	50
7.2.2. Амплитудная оптоволоконная технология .....	51

7.2.3. Поляризационная оптоволоконная технология .....	51
7.3. Расходомеры .....	53
7.4. Датчики давления .....	55
7.5. Датчики уровня .....	59
7.6. Позиционные датчики. Датчики расстояния .....	60
7.7. Датчики времени.....	65
7.8. Датчики тока .....	65
7.9. GPS.....	67
7.10. Способы соединения датчиков .....	69
7.11. Направления развития датчиков и измерительных устройств....	70
8. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ .....	71
9. ЛИНИИ СВЯЗИ.....	73
10. ИНТЕРФЕЙСЫ TCAU .....	82
10.1. Общие сведения .....	82
10.2. Физические интерфейсы .....	85
10.2.1. Интерфейс RS-232 .....	85
10.2.2. Интерфейс RS-485 .....	88
10.2.3. CAN-интерфейс .....	91
10.2.4. Интерфейс AS.....	95
10.2.5. Интерфейс PROFIBUS .....	97
11. УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ .....	100
12. ПРОМЫШЛЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ И ПРОГРАММИРУЕМЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ.....	102
13. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ.....	109
13.1. Схемы связи контроллеров с объектами управления .....	109
13.2. Топология промышленных сетей.....	110
13.3. Сравнительные характеристики основных топологий.....	111
13.4. Методы организации доступа к сети .....	111
14. ПРОМЫШЛЕННЫЕ СЕТИ.....	113
14.1. Сравнительные характеристики сетей типов Fieldbus и Sensorbus .....	113
14.2. Сравнительные характеристики сенсорных сетей .....	114
14.3. Сравнительные характеристики контроллерных сетей.....	115
15. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СЕТИ .....	117
15.1. Сеть Foundation Fieldbus.....	117
15.2. Сеть Ethernet.....	117
15.3. Шина Profibus-DP фирмы Siemens.....	118

15.4. Устройства межсетевого сопряжения .....	120
16. УСТРОЙСТВА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА.....	122
17. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ .....	126
17.1. Классификация исполнительных механизмов и регулирующих органов .....	127
17.2. Классификация, структуры и состав электромашинных исполнительных механизмов .....	129
17.3. Общие сведения об электромашинных устройствах исполнительных механизмов .....	133
17.4. Регулирующие клапаны.....	136
17.5. Насосы.....	139
17.6. Вентиляторы.....	144
17.7. Реле .....	147
18. ЗАЩИТА АППАРАТУРЫ .....	150
18.1. Защита аппаратуры от механических воздействий.....	150
18.2. Защита аппаратуры от воздействия помех.....	153
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	163



*Учебное издание*

**Старостин** Александр Алексеевич  
**Лаптева** Анна Викторовна

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Редактор *Л. Ю. Козяйчева*  
Верстка *Е. В. Суховой*

Подписано в печать 20.08.2015. Формат 70×100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 13,55.  
Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 50 экз. Заказ 240.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: 8 (343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru



#### **СТАРОСТИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ**

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Автоматика» ИРИТ-РтФ, старший научный сотрудник Института теплофизики УрО РАН.

Автор более 60 научных и учебно-методических работ.

Область научных интересов – измерения в быстропротекающих процессах и автоматизация научных экспериментов.



#### **ЛАПТЕВА АННА ВИКТОРОВНА**

Старший преподаватель кафедры «Автоматика» ИРИТ-РтФ.

Автор более 80 научных и учебно-методических работ.

Область научных интересов – автоматизация технологических процессов в черной металлургии.