

*Барашко Олег Георгиевич*

АВТОМАТИКА,  
АВТОМАТИЗАЦИЯ  
И  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

**Курс лекций**  
(электронный вариант ver. 1.2)

Минск 2011

## ПАНОРАМА КУРСА

**ЧТО такое «автоматика» и «автоматизация».** АВТОМАТИКА – область теоретических и прикладных знаний об автоматически (без участия человека) действующих системах и устройствах.

АВТОМАТИЗАЦИЯ – применение технических средств, освобождающих человека (частично или полностью) от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования материалов, энергии и информации. Автоматизация подразумевает *замещение* определенных естественных человеческих функций искусственными устройствами (техническими средствами). К таким функциям относятся:

- органы чувств (сенсоры – зрение, слух, ощущения);
- двигательные (исполнительные) органы, реагирующие на действие внешних или внутренних раздражителей (например, с помощью автопогрузчиков или роботов, заменяющих поднятие и перемещение изделий);
- центральная нервная система, служащая для координации (выработки осмысленных воздействий) и интеграции органов чувств и двигательных органов (например, с помощью промышленных контроллеров и/или компьютеров).

Автоматизация может возрастать в той степени, в какой может увеличиваться масштаб подобного замещения, например, в результате совершенствования машинного зрения, конструкции механических пальцев и искусственного интеллекта у роботов.

«Автоматика», «автоматизация» являются составным компонентом более глобального, обобщающего понятия: *управления*, т.е. осознанного целенаправленного воздействия – от мягкой коррекции до энергичного вмешательства.

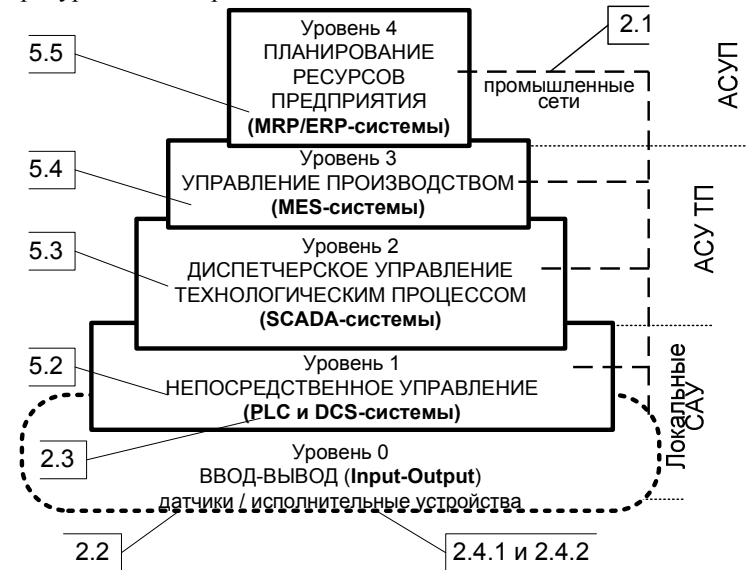
Аксиомы автоматики:

1) то, что мы не можем измерить, тем мы не можем управлять (или более мягко: «то, что мы можем плохо измерить, тем мы и плохо управляем»);

2) контроль – процесс пассивный (наблюдение), а управление – активный (действие); контроль является составной частью управления;

3) система управления должна быть адекватна (такой же) по сложности объекту управления и учитывать его особенности.

**Структура автоматизированной системы управления (АСУ).** Учитывая иерархичность структуры промышленной системы (предприятия), задача управления решается на основе многоуровневой автоматизированной системы управления (АСУ), представленной в виде четырехуровневой пирамиды



Иерархическая автоматизированная система управления (цифрами указаны соответствующие разделы концепта)

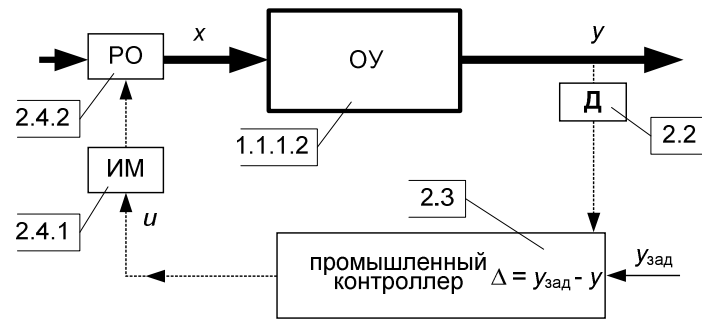
«Борьба» с колебаниями переменных, характеризующих технологический процесс – традиционная задача автоматизации. И она традиционно осуществлялась с помощью фундаментального принципа – обратной связи. Он декларирует постоянное сравнение текущего состояния ОУ с заданным.

Традиционные задачи автоматизации:

- «борьба» с колебаниями переменных, характеризующих технологический процесс
- организация ритмичной работы

Надо помнить, что в реальной практике задач автоматизации возникают многочисленные, жизненно важные «если», «и», «но», приводящие к тому, что наши действия не имеют изящных ответов или простых правильных решений.

## Уровни 0 и 1 Структура и базовые элементы локальной САУ



Базовая схема взаимодействия объекта управления (ОУ) и локальной одноконтурной системы автоматического управления (САУ) с основными базовыми элементами (датчик, промышленный контроллер и исполнительный механизм). Точечная линия – обратная связь, на основе которой функционирует подавляющее число САУ. Физически реализуется промышленными локальными сетями (см. 2.1). Цифрами указаны соответствующие разделы конспекта

$x$  – входная переменная;  $y$  – выходная переменная;  $u_{зад}$  – задающее воздействие (уставка);  $u$  – управляющее воздействие.

**ОУ** – объект управления;

**Д** – датчик (воспринимающее устройство, первичный преобразователь, сенсор);

**ИМ** – исполнительный механизм;

**РО** – регулирующий орган.

По сути идея автоматике – это правда в трех аккордах. Идея функционирования любой одноконтурной локальной САУ чрезвычайно проста – это постоянно повторяющиеся операции:

- 1) измерение переменной процесса  $y$ ,
- 2) сравнение результатов измерения  $y$  с заданным значением  $u_{зад}$  и выработка отклонения  $\Delta = u_{зад} - y$
- 3) реализация воздействия на основе отклонения  $\Delta$  на исполнительный механизм и далее на регулирующий орган с целью максимального приближения переменной процесса  $y$  к заданному значению  $u_{зад}$  с последующим удержанием на заданном значении.

Для успешной работы САУ надо хорошо знать сам объект управления (технологии) и каналы воздействия на него. **Вся же сложность заключается в технической реализации базовых элементов.**

**ЗАЧЕМ изучать «автоматику» и «автоматизацию».** Знание автоматизации и АСУ дает определенные конкурентные преимущества, т. к. позволяет инженеру (технологу, механику) и руководящему персоналу (менеджеру):

- 1) измерять и контролировать ресурсы предприятия:
  - а) материальные (технологические, производственные);
  - б) диагностические (состояние оборудования);
  - в) экономические (финансовые);
  - г) организационные (кадры).

и на их основе принимать обоснованные решения, связанные с диагностикой, планированием и прогнозированием.

- 2) управлять («подправлять») без участия человека (автоматически) или с его участием («автоматизированно») функционированием промышленной системы.

После освоения этого курса вовсе не обязательно стать разработчиком промышленных контроллеров или новых методов управления. Зато можно стать *компетентным* заказчиком или пользователем, достаточно сведущим, чтобы:

- заказать работоспособную компьютерную систему автоматического управления из соответствующим образом подобранных аппаратных (технических средств) и программных компонентов;
- оценить ее возможности, преимущества и ... ограничения;
- осознанно ее эксплуатировать и модифицировать.

Кроме того, у автора существует надежда, что Вы как специалисты в смежных областях, используете этот материал, чтобы расширить собственный кругозор и посмотреть на избранную Вами специальность под другим углом.

Данный текст предполагает как сплошное (подряд), так и выборочное (перекрестные ссылки, указатели, словарь) чтение, а в конце каждого раздела сделано его краткое резюме-содержание.

Если при работе с данным текстом Вы обнаружите ошибки, опечатки или неточности, если у Вас есть предложения по его совершенствованию – просьба сообщить об этом любым удобным для Вас способом. С уважением *Олег Георгиевич Барашко* [ogb\\_info@tut.by](mailto:ogb_info@tut.by)

# 1. КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (САУ)

## 1.1. Системы управления: ключевые понятия и определения

### 1.1.1. Базовые компоненты

#### 1.1.1.1. Общая структура

Основой деятельности любой промышленной системы – предприятия является производственный процесс – совокупность взаимосвязанных целенаправленных процессов (протекающих в устройствах искусственного происхождения: станках, аппаратах и т. п.), в ходе которых ресурсы предприятия (материальные, энергетические, финансовые, организационные) преобразуются в продукцию (полуфабрикаты, изделия) и/или услуги (проектирование, монтаж, наладка, ремонт и т. п.) (рис. 1.1).

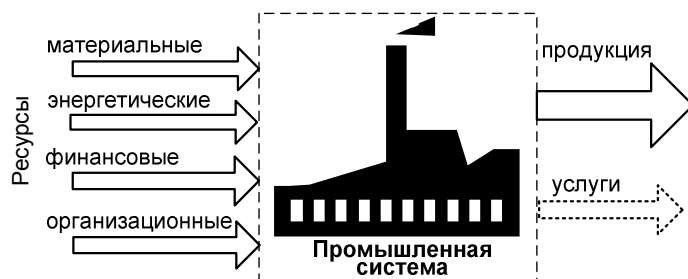


Рис.1.1. Схема преобразования в промышленной системе входных потоков ресурсов в выходную продукцию и услуги

При функционировании такой системы могут возникать нежелательные, трудно контролируемые отклонения её характеристик от заданных (нормальных) режимов, вызванные различными причинами (в автоматике их называют *возмущениями*).

Сами производственные процессы (в автоматике их называют *объекты управления* – ОУ), входящие в производственные системы не всегда могут устранить эти отклонения, поэтому их снабжают *системами управления* (СУ), которые и обеспечивают их нормальный ход протекания в соответствии с *заданием* (техрегламентом).

Компонентами системы управления предприятия являются как специальные технические средства (датчики, исполнительные механизмы, локальные промышленные сети, промышленные контроллеры,

компьютеры и т. п.), так и управленческие службы (снабжение, сбыт, бухгалтерия, кадры и т.п.).

Таким образом, управление производственной системой предполагает совокупность целенаправленных воздействий, призванных обеспечить ее эффективное (с точки зрения заданных критериев) функционирование, а его реализация происходит в рамках общей структуры, содержащей два базовых элемента:

- объект управления (ОУ);
- система управления (СУ).

Связь между ОУ и СУ осуществляется на основе *обратной связи* (ОС).

В самом общем виде процесс управления производственной системой может быть проиллюстрирован с помощью схемы, приведенной на рис. 1.2.

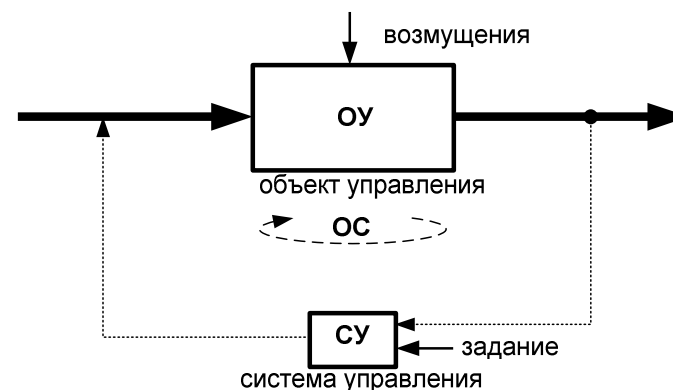


Рис.1.2. Типичное соединение ОУ (его важность подчеркнута увеличенным размером блока) и СУ. Обратите внимание на особенность схемы – замкнутый контур на основе информационной обратной связи (ОС), выделенной точечной линией, в котором непрерывно циркулирует информация о состоянии ОУ. Возмущения случайным образом воздействуют на ОУ, мешая его функционированию, а задание – осознанно устанавливается в СУ

Рассмотрим подробнее каждую составляющую этой концептуальной схемы, т.е. ОУ (см. 1.1.1.2), СУ (см. 1.1.2) и ОС (см. 1.1.1.3).

### 1.1.1.2. Объект управления (иерархичность, переменные)

Иерархичность ОУ и её свойства  
 Основные классы систем управления ОУ  
 Переменные ОУ

**Иерархичность ОУ и её свойства.** Любая промышленная система иерархична (многоуровневая), поэтому следует различать и иерархию объектов управления (вертикальную и горизонтальную), которую удобно пояснить на рис. 1.3.

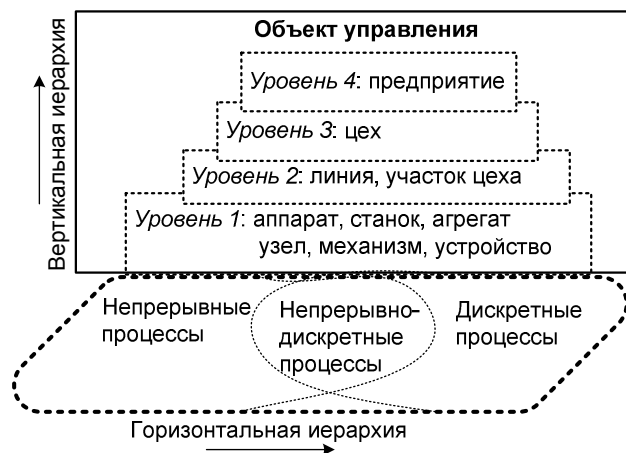


Рис.1.3. Иерархия ОУ промышленной системы

Объекты управления, принадлежащие каждому вертикальному иерархическому уровню, могут рассматриваться и как системы, образованные из подсистем (объекты более низких уровней), и как подсистемы, входящие в состав некоторой системы (объект более высокого уровня).

Для таких систем характерны три основных свойства:

1. Каждый уровень иерархии имеет свой собственный язык описания, свою систему концепций и принципов. Так, понятие «максимальная производительность» лишено смысла на молекулярном уровне. Понятия давление, объем и температура, определяющие главные свойства жидкости и газа, утрачивают содержание на атомарном или

молекулярном уровне.

2. На каждом уровне иерархии происходит обобщение свойств более низких уровней. Закономерности, обнаруженные и описанные для последних, могут быть включены в общую систему, обретая при этом связь с объектом высшего уровня. Таким образом, описание на более низком уровне способствует пониманию явлений, имеющих место на более высоком.

3. Взаимосвязи между уровнями не симметричны (асимметричны). Для нормального функционирования объектов высшего уровня необходимо, чтобы успешно «работали» объекты более низкого уровня, но не наоборот.

**Непрерывность и дискретность ОУ.** Одним из явных признаков классификации объектов управления в горизонтальном иерархическом уровне может служить характер протекания процесса во времени, что определяется непрерывностью или дискретностью поступления сырья, полуфабрикатов и изготовления готового продукта, а также определяется временем их пребывания в установившемся и неуставившемся (переходном) состояниях.

Непрерывные	продукция непрерывно вырабатывается при непрерывном подводе сырья и энергии, компонентов, управляющих воздействий и т. п. (сушка, смешивание, измельчение и т. п.). Эти процессы имеют достаточную стабильность и стационарность (неизменность характеристик во времени). Значительных трудностей в управлении непрерывными технологическими процессами не возникает ввиду их непрерывности и стационарности. Управление этими процессами осуществляется локальными САУ.
Дискретные	периодическая повторяемость различных ситуаций с чередованием операций перемещения и преобразования, важных при производстве штучных изделий. Характерный признак – большое число однородных изделий во времени (конвейерные линии). К дискретным процессам также относят процессы порционного и многокомпонентного дозирования в емкости, фасовка в тару (пакеты, мешки, ящики и т. д.), отбраковка готовых изделий.

Непрерывно-дискретные	в течение определённого (относительно длительного) промежутка времени (часов или дней) непрерывно вырабатывается определённое, ограниченное количество продукта, периодически выгружаемого из аппарата. Характерно наличие циклов и сочетание особенностей непрерывного и дискретного процессов.
-----------------------	--

Квалификации инженера наиболее соответствуют углубленные знания о том уровне промышленной системы, где объектами управления являются: *механизмы, устройства, станки, машины, аппараты, агрегаты, линии*, т. е. те объекты, в которых непосредственно протекают производственные процессы. Это главное действующее лицо схемы на рис. 1.2: без него наличие системы управления теряет всякий смысл. Подробнее об иерархии систем управления (см. 1.1.5)

**Объекты управления и основные классы систем управления.** Среди объектов управления можно выделить два основных класса: объекты стационарные или непрерывного действия и объекты нестационарные периодического или даже разового действия.

Первый класс – многочисленные агрегаты, производящие энергию и большинство видов используемых человеком материалов: тепловые станции, котельные, большинство агрегатов и установок химической, нефтехимической, пищевой и т.д. промышленности.

Их отличительная особенность с точки зрения управления — это поддержание стабильного, неизменного режима работы несмотря на возможные возмущения (помехи) — изменение нагрузки, качества сырья и других факторов, способных на него повлиять. Это наиболее чётко выраженный вариант замкнутого управления с обратной связью.

Второй класс объектов — это объекты, цель управления которыми может быть достигнута только в результате изменения их состояния и/или положения относительно окружающей их среды (сборочные конвейеры и поточные линии). Управление дискретными процессами и потоками штучных изделий реализуется с помощью жестко фиксированных (в управлении) автоматов (программное управление — это управление каким-либо процессом по заданному закону — программе), когда оборудование выполняет ряд наперед заданных операций. Это наиболее чётко выраженный вариант разомкнутого управления.

Для дискретного процесса (наряду со стабилизацией отдельных переменных) необходимо организовать взаимодействие агрегатов, со-

гласовать режимы последовательно работающих агрегатов, распределить нагрузку между параллельно работающими агрегатами и т. д.

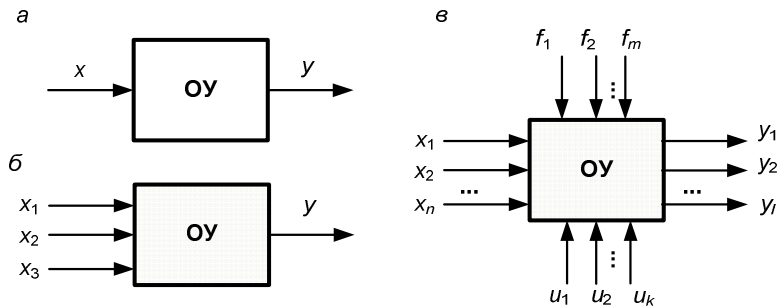
Для объекта (агрегата) периодического действия при выполнении определенной последовательностью действий от системы управления требуется надежная работа. Например, в точно заданные моменты времени необходимо открыть клапан, проверить, действительно ли он открылся, выдержать заданное время, закрыть этот клапан, открыть другой и т.п. При этом речь идет только о жестком автомате, работающем по времени, без регулирования. Однако и в этом случае от системы требуется предпринять нестандартные действия в случае несрабатывания исполнительного механизма.

Особенно часто при управлении дискретными процессами необходим учет времени, в течение которого протекает данный процесс, требуется слежение за протеканием нескольких асинхронно проходящих процессов.

Таким образом, цели управления этими двумя классами ОУ в известном смысле противоположны — в первом случае стабилизация, неизменность состояния ОУ (стабилизация его технологических переменных), во втором, — наоборот, поиск управляющих воздействий, изменяющих состояние ОУ в соответствии с заданной последовательностью действий (программное управление).

В большинстве случаев объекты обоих классов нуждаются не просто в управлении, а в управлении оптимальном или близком к оптимальному, то есть наилучшем с точки зрения некоторого заданного критерия.

**Переменные ОУ.** Изучение вопросов управления (автоматизации) производственным процессом начинается с его исследования как объекта управления, т. е. выявления совокупности технологических *переменных*, достаточных для оценки (контроля) его состояния и управления. С этой целью объект (процесс) представляют в виде структурной схемы (рис. 1.4):



**Рис 1.4.** а) простейшая форма: «один вход  $x$  – один выход  $y$ » (SISO, single input – single output); б) более распространена форма «много входов – один выход» (MISO, multiply input – single output); в) общий случай: «много входов – много выходов» (MIMO, multiply input – multiply output)

где

$x_n$  – входная переменная, которую можно измерить, но воздействовать на нее нельзя;

$u_k$  – управляющая переменная, воздействуя на которую можно управлять ОУ;

$f_m$  – возмущающая переменная (нагрузка) – может быть измерена, но неуправляема (значение меняется случайным образом);

$y_l$  – выходная управляемая переменная (характеризуется воздействием  $x, u, f$ ).

**Возмущения.** Нежелательные, трудно контролируемые отклонения характеристик ОУ от заданных (нормальных) режимов. Основные причины возникновения возмущений:

а) по материальным ресурсам:

- разнородное качество сырья;
- изменение эксплуатационных характеристик оборудования (например, вследствие старения, износа, коррозии, скрытых поломок и т. п.);

- внешние факторы (климатические – температура, влажность).
- б) по энергетическим ресурсам:
- перебои с подачей энергии;
- в) по финансовым ресурсам:
- изменение инвестиционного климата.
- г) по организационным ресурсам:
- человеческий фактор.

### 1.1.1.3. Обратная связь

Понятие обратной связи

Виды обратной связи

**Понятие обратной связи.** Обратная связь – связь, при помощи которой информация о состоянии ОУ (внутри и/или с его выхода) передается на вход СУ.

Механизм обратной связи позволяет системам любого типа – техническим, экономическим, организационным, социальным и т. п. – оставаться в состоянии равновесия. Обратная связь не только стабилизирует процессы, но и служит механизмом, способствующим их развитию; еще Чарльз Дарвин оценил значение обратной связи в эволюции.

Принцип управления по обратной связи предполагает постоянное сравнение текущего состояния системы  $y(t)$  с желаемым (заданным по технологическому регламенту)  $y_{зад}(t)$  и выработку управляющих сигналов на основании полученной в результате сравнения разности (отклонения, рассогласования, ошибки)  $\Delta(t)$  (рис. 1.5):

$$\Delta(t) = y_{зад}(t) \pm y(t)$$

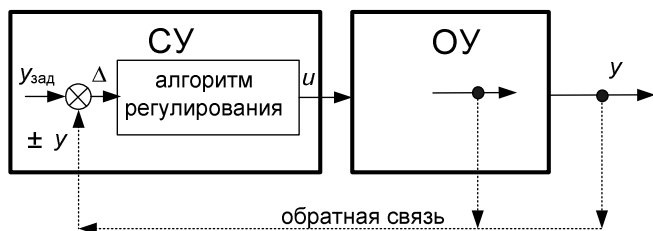
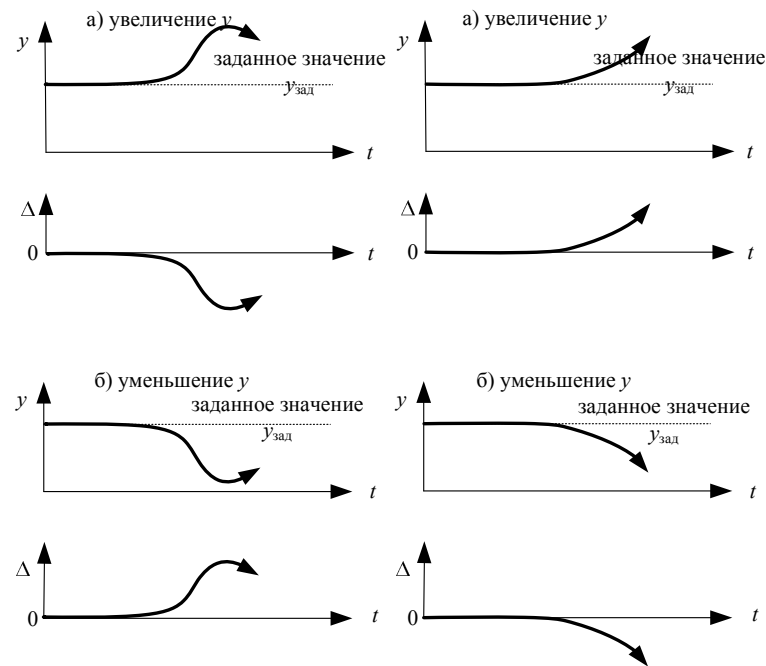


Рис. 1.5. Принцип управления по обратной связи

Обратная связь позволяет строить сложные, самоуправляемые технические системы. Это фундаментальный принцип на основе которого функционирует подавляющее число СУ.

**Виды обратной связи.** В замкнутом контуре связи «ОУ-СУ» различают «положительную» и/или «отрицательную» обратные связи (в формуле присутствует операция  $\pm$ ). Такое разделение обычно ассоциируется с «хорошей» и «плохой» обратной связью, но на самом деле это всего лишь операция суммирования и, соответственно, вычитания текущего сигнала  $y(t)$  с заданным  $y_{зад}(t)$ .



<p>«Отрицательная» ОС способствует уменьшению рассогласования <math>\Delta(t)</math> СУ и приводит систему в равновесное состояние, т.е. стабилизирует выходную переменную <math>y(t)</math> ОУ. На отрицательной обратной связи строится подавляющее число систем управления.</p>	<p>«Положительная» ОС способствует увеличению рассогласования <math>\Delta(t)</math> СУ и препятствует приведению ее в равновесное состояние, т.е. не стабилизирует выходную переменную <math>y(t)</math>, а отклоняет её к одному из крайних положений, вызывая неустойчивость. Применяется в системах усиления сигнала.</p>
--	---



### 1.1.2. Локальная САУ (структура, базовые элементы, критерии управления)

Структура и базовые элементы САУ  
Критерии управления

**Структура и базовые элементы.** Иерархичность объектов управления (см. 1.1.1.2) порождает иерархию систем управления (см. 1.1.5). Известен постулат теории управления: система управления должна быть адекватна по сложности управляемому объекту. Интуитивно ясно, что средства, методы и критерии управления, например, каким-либо станком и сушильным аппаратом будут отличаться друг от друга (горизонтальный срез иерархии), и, в свою очередь, будут иными, чем, скажем, предприятия или даже цеха (вертикальный срез иерархии).

Несмотря на иерархию ОУ, структура взаимосвязи ОУ и САУ будет подобной на рис. 1.6 а, однако такая схема лишь поясняет принцип ее взаимодействия с ОУ. При практической реализации локальная САУ для первого уровня ОУ (механизм, устройство, станок, машина, аппарат, агрегат и т. п.) состоит из ряда базовых элементов (рис. 1.6 б.).

**Д** – датчик (воспринимающее устройство, первичный измерительный преобразователь, сенсор) – устройство, преобразующее физическую величину (например, температуру  $T$ , давление  $P$ , расход  $F$ , концентрацию  $Q$ , массу  $W$ , скорость  $S$  и т.д.) в сигнал, удобный для передачи (электрический, гидравлический, пневматический, механический) (см. 2.2).

**УУ** – управляющее устройство (на практике реализуются в виде промышленного контроллера PLC (Programmer Logic Controller) (см. 2.3). Обычно в нем предусмотрены функции задания, сравнения и выработки алгоритма регулирования:

**ЗУ** (задающее устройство) – служит для установления заданного значения  $u_{зад}$  управляемой переменной  $y$ . Установка производится: а) вручную, б) автоматически;

**Ср** (сравнивающее устройство) – сравнивает (обычно это операция вычитания, т.е. отрицательная обратная связь) текущее  $y$  и заданное значение  $u_{зад}$  технологической переменной. В результате на его выходе формируется сигнал рассогласования  $\Delta$ ;

**Ус** /при необходимости/ (усилительное устройство) – усиливает мощность сигнала рассогласования  $\Delta$ . Применяются элек-

тронные, гидравлические, пневматические, магнитные усилители.

**Алгоритм регулирования** – внутри PLC вырабатывается определенный алгоритм регулирования (см. 3.2, 4.4 и 4.5) в зависимости от объекта управления (непрерывный и/или дискретный). В первом случае обрабатывается стабилизация, неизменность состояния ОУ (стабилизация его технологических переменных), во втором, — наоборот, обработки управляющих воздействий, изменяющих состояние ОУ в соответствии с заданной последовательностью действий (программное управление).

**ИМ** – исполнительный механизм. Обычно это силовое устройство с достаточно большой мощностью (двигатели электрические, гидравлические, пневматические, электромагнитные, поршневые устройства, муфты) (см. 2.4.1.)

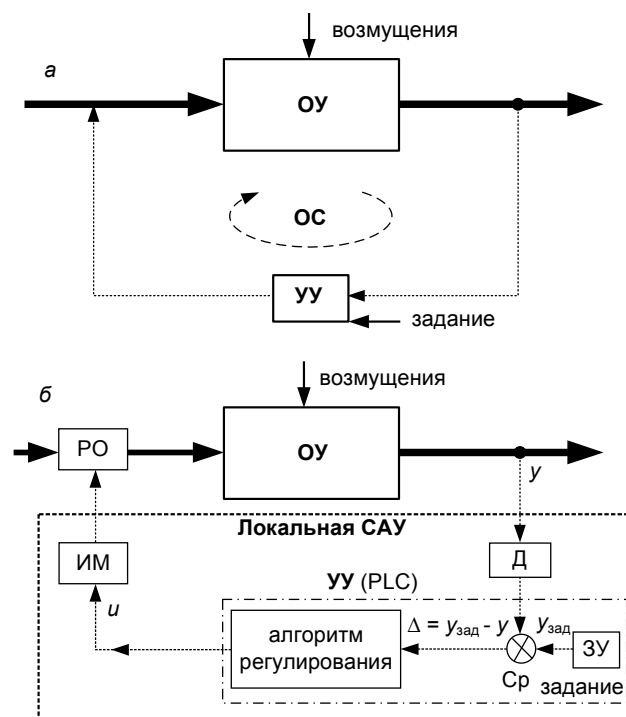
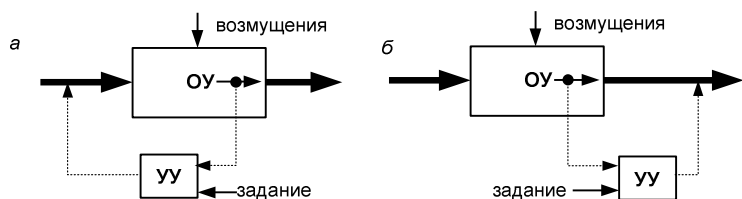


Рис. 1.6. а) концептуальная схема взаимодействия ОУ с САУ б) детализированная схема локальной САУ с базовыми элементами

**РО** – регулирующий орган, механическое устройство, непосредственно воздействующее на ОУ путём изменения количественных и качественных характеристик материальных и энергетических потоков (вентили, клапаны, дозаторы, насосы, транспортеры, шнеки, вентиляторы, заслонки, шиберы, прижимные вальцы, каландры, ТЭНы, режущий инструмент и т. п.) (см. 2.4.2.).

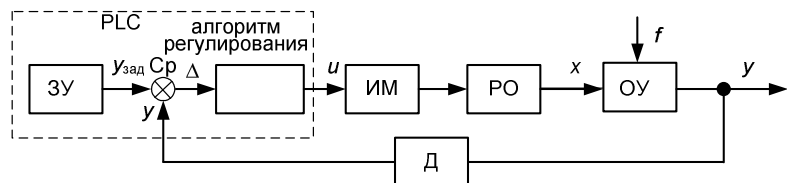
В ряде систем управления ИМ и РО отсутствуют, и регулирование переменных промышленного процесса выполняется без помощи механических устройств (ток, напряжение).

Вовсе не обязательно, чтобы управление осуществлялось именно выходной переменной – все зависит от технологии процесса, т.е. объекта управления. Например, существуют варианты реализации (рис. 1.7)



**Рис. 1.7.** Варианты построения структуры САУ: а) управление переменной ОУ изменением входного материального потока б) управление переменной ОУ изменением выходного материального потока

Обычно, схема на рис. 1.6 б преобразуется к виду (рис. 1.8):



**Рис. 1.8.** Вид схемы САУ, преобразованной для расчета

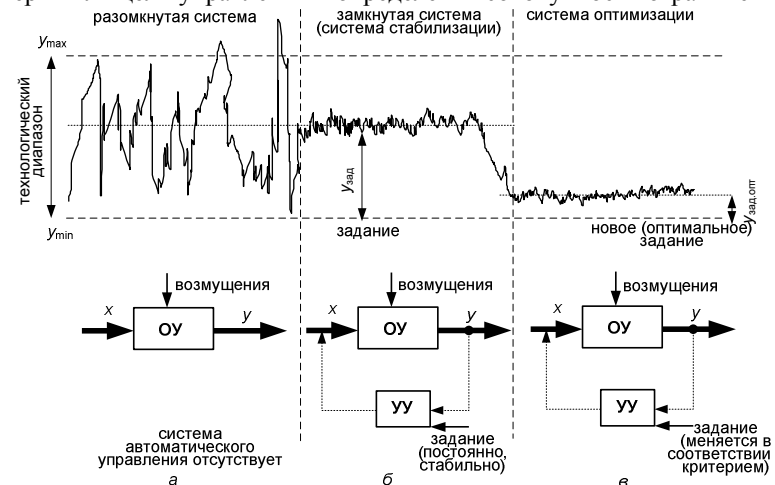
**Критерии управления.** Всякое управление имеет цель (критерий). И всякое управление направлено на объект управления.

Цель управления может быть только одна. Нельзя произвести одновременно наилучшую и самую дешевую продукцию. Можно искать

либо наилучшую продукцию за данную цену, либо самую дешевую продукцию определенного качества. В задачах такого рода следует тщательно различать цель (например, купить самую лучшую продукцию) и ограничения (в данном случае заплатить за продукцию сумму, не превосходящую заданную). Поэтому всегда можно говорить об управлении, оптимальном в известном смысле, например, целью (критерием) может быть:

- минимизация отклонения технологической переменной от заданного значения;
- максимизация прибыли за заданный период времени;
- минимизация издержек производства и т.д.

Этот простой пример ближе по своему характеру к экономическим задачам, чем к задачам управления технологическими объектами, однако, он ясно показывает проблему выбора единственного критерия или цели управления и определения совокупности ограничений.



**Рис. 1.9.** Сравнение поведения выходной переменной  $y$  объекта управления: а) без САУ, б) с системой стабилизации в) с системой оптимизации

Выбор и формулировка критерия, а также выявление ограничений требуют создания модели объекта.

Понятно, что любое явление или объект материального мира не могут быть абсолютно точно, адекватно и полно описаны никаким способом. Идеальной моделью объекта является только сам модели-

руемый объект.

Однако к счастью, в большинстве случаев можно обойтись достаточно грубыми приближениями.

Модель объекта — это не всегда математическое описание его свойств, хотя в большинстве случаев математическая модель оказывается основой при построении системы управления (см. 1.2).

### 1.1.3. Функции локальных САУ

Локальные САУ аппаратов, агрегатов, установок, механизмов, линий и т.д. и т.п. реализуют следующие основные функции:

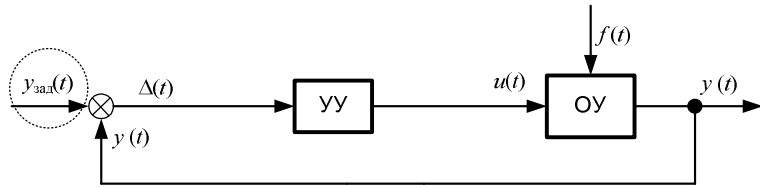
- *автоматический пуск и остановка* – обеспечивают запуск в действие оборудования по сигналу из пункта управления, но при наличии определенной совокупности внешних условий. При этом соблюдаются последовательность операций и координация их между собой;
- *автоматический контроль и сигнализация* предназначены для выполнения непрерывного измерения, записи переменных, характеризующих состояние и работу оборудования, а также для сигнализации при отклонении этих величин от допустимых пределов. осуществляют измерение физических величин, т. е. выполняют операцию измерения и устанавливают соответствие между результатом измерения и заданным значением этой величины, а также информируют оперативный персонал о состоянии переменных технологического процесса (технологическая сигнализация) и состоянии оборудования (производственная сигнализация). По назначению сигнализация подразделяется на рабочую, предупреждающую и аварийную. При нарушении режима обеспечивается подача звукового или светового сигналов. Звуковой сигнал служит для привлечения внимания обслуживающего персонала и является общим для всех световых сигналов схемы, каждый из которых указывает место нарушения режима или возникновения неисправности. Звуковой сигнал выключается оперативным персоналом, а световой остается включенным до устранения причины, вызывающей его появление. Существуют схемы сигнализации без повторности действия и с повторностью действия звукового сигнала. Первые применяют в тех случаях, когда появление хотя бы одного из сигналов вызывает остановку всей системы или необходимость в остановке всего агрегата. Вторые применяют в тех случаях, когда возможно последовательное замыкание нескольких сигнальных контактов и при замыкании каждого из них необходимо получить звуковой

сигнал, при этом причина, вызвавшая появление предыдущего сигнала, еще не устранена;

- *автоматическое регулирование* – поддерживает постоянство или изменение по определенной программе технологических переменных, обеспечивающих безопасность, надежность и эффективность эксплуатации технологического оборудования;
- *автоматическая защита* – предохраняет оборудование от аварий. Она выводит из действия все оборудование или его часть, которой непосредственно грозит авария из-за неисправности ОУ и/или САУ или неправильных действий обслуживающего персонала. К автоматической защите относятся также устройства блокировки, допускающие выполнение операции по включению в действие или по отключению элементов оборудования только в заданной последовательности.

### 1.1.4. Локальные САУ: классификация

1. по характеру изменения задающего воздействия  $y_{зад}$  (по алгоритму функционирования).



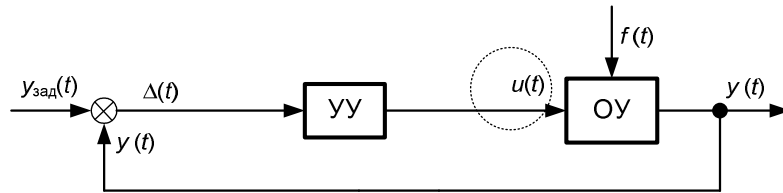
а) *системы стабилизации* – предназначены для поддержания с заданной точностью (стабилизации) управляемой переменной  $y$ . Задающее воздействие  $y_{зад}$  постоянно (стабильно).

б) *системы программного управления* – предназначены для регулирования управляемой переменной  $y$  задающим воздействием  $y_{зад}$  по заданной программе во времени.

в) *следящие системы* – предназначены для изменения управляемой переменной  $y$  в соответствии с заранее неизвестной функцией времени, определяемой задающим воздействием  $y_{зад}$ .

2. по принципу управления – т.е. на основании какой информации формируется управляющее воздействие (переменная)  $u(t)$ .

а) *управление по отклонению* (замкнутые системы).

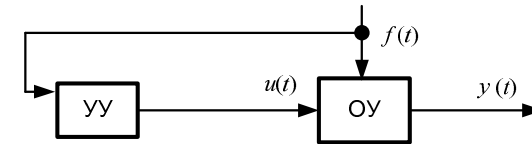


Управляющее воздействие  $u(t)$  формируется на базе информации об отклонении управляемой величины  $y$  от заданного значения  $y_{зад}$ .

$$u(t) = f[y_{зад}(t) - y(t)] = f[\Delta(t)]$$

Характерный признак: обратная связь. Достоинство: высокая точность.

б) *управление по возмущению* (разомкнутые системы).



$$u(t) = f[f(t)]$$

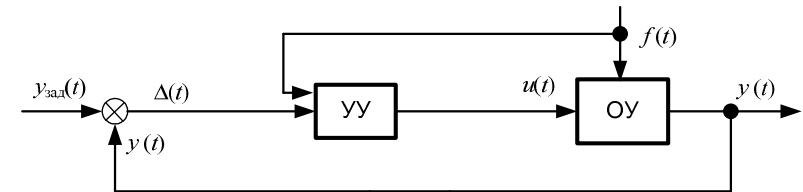
Управляющее воздействие  $u(t)$  формируется в зависимости от результатов непосредственного измерения возмущающей переменной  $f(t)$ , действующей на ОУ. Могут строиться как системы программного управления.

Характерный признак: нет обратной связи.

Достоинство: высокое быстродействие.

Недостаток: не все возмущения можно измерить.

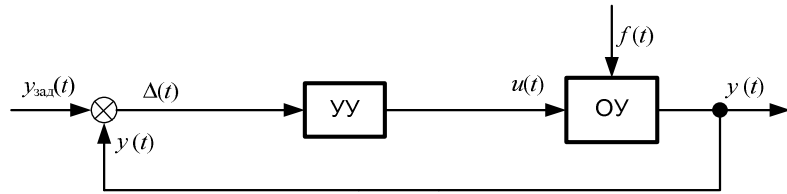
в) *комбинированное управление* = по отклонению + по возмущению.



Достоинство: имеют высокое быстродействие и точность, а неучтённые возмущения компенсируются (ослабляются) за счёт обратной связи.

3. по числу контуров управления.

а) *одноконтурные* (пример САУ по отклонению).



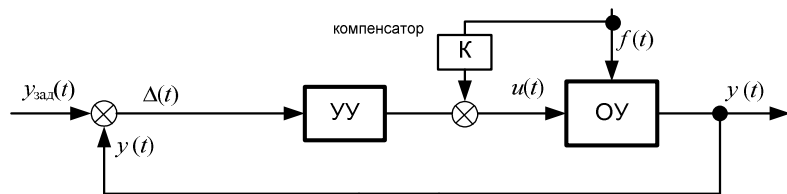
б) *многоконтурные*: комбинированные и каскадные.

б<sub>1</sub>) комбинированные. Пример: если ОУ подвержен действию существенных контролируемых возмущений.

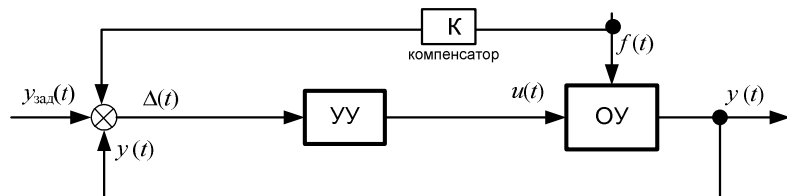
Система содержит вспомогательное регулирующее устройство – динамический компенсатор, который формирует корректирующий импульс по наиболее сильному возмущению. Это позволяет существенно снизить динамическую ошибку регулирования.

Возможны два варианта включения динамического компенсатора:

- его выход подсоединяется на вход ОУ.



- его выход подсоединяется к входу регулятора.

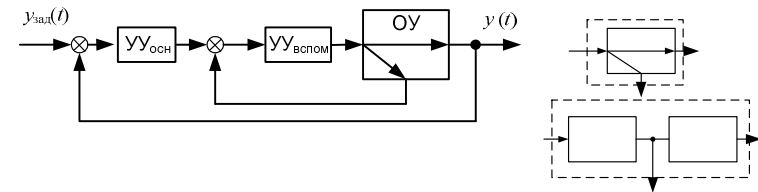


б<sub>2</sub>) каскадные системы управления используются для ОУ обладающих большой инерционностью по каналу регулирования, если

можно выбрать менее инерционную по отношению к наиболее опасным возмущениям промежуточную переменную (координату).

В этом случае САУ включает два регулятора:

- основной (внешний) – служит для стабилизации основной выходной переменной  $y$ .
- вспомогательный (внутренний) – служит для регулирования вспомогательной (промежуточной) переменной.



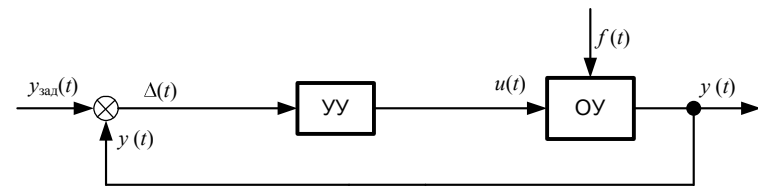
Особенности:

а) заданием для вспомогательного регулятора служит входной сигнал основного регулятора.

б) вспомогательный контур обладает более высоким быстродействием, что повышает качество работы САУ, особенно при компенсации возмущений, поступающих по каналу регулирования.

4. по числу управляемых переменных

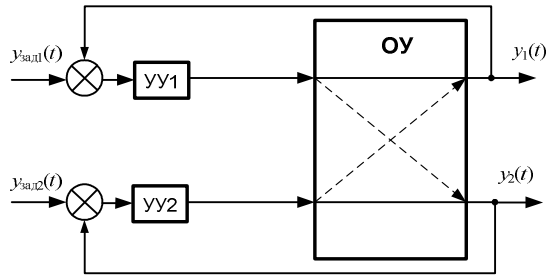
а) *одномерные*, т.е. один вход и один выход.



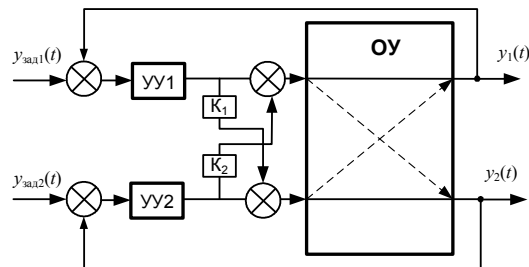
б) *многомерные*. К ним относятся САУ имеющие ОУ с несколькими входами и выходами взаимно связанными между собой (много-связные объекты).

Существуют 2 подхода к автоматизации многосвязных ОУ:

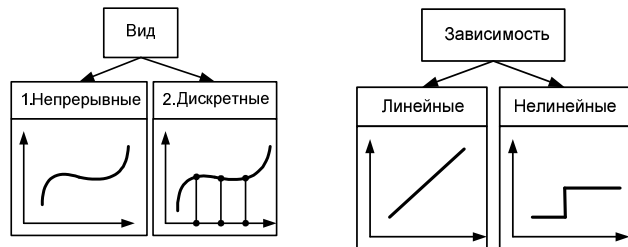
1) несвязное регулирование отдельных выходных переменных с помощью одноконтурных САУ. *Применение*: влияние перекрестных связей намного слабее, чем основных.



2) связанное регулирование – имеют кроме основных регуляторов дополнительные динамические компенсаторы (К1 и К2). *Применение:* влияние перекрестных связей сильнее, чем основных.



5. по виду и зависимости входных и выходных переменных



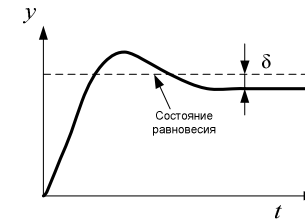
Пояснение:

1) Непрерывно изменяются переменные и непрерывно формируется сигнал на ИМ.

2) Управление осуществляется через определённые промежутки времени.

6. по свойствам в установившемся режиме (оценивается по величине статической ошибки  $\delta$ ).

- а) статические САУ – при  $y_{зад} = \text{const}$ ,  $\delta \neq 0$ .
- б) астатические САУ – при  $y_{зад} = \text{const}$ ,  $\delta = 0$ .



7. по степени участия человека:



В зависимости от степени участия оператора в процессе управления различают следующие режимы:

*ручного управления* — ручной режим, при котором все операции по управлению осуществляются оператором;

*полуавтоматического управления* — полуавтоматический режим (автоматизированный режим), при котором реализация основных командных операций по управлению возлагается на оператора;

*автоматического управления* — автоматический режим, при котором управление происходит без участия оператора, но по его заданию и при его контроле.

*Автоматическое, автоматизированное и ручное управление* обеспечивают заданный порядок и последовательность пуска, работы и остановки механизмов и устройств, участвующих в процессе, путем введения соответствующих блокировок.

В зависимости от места расположения командной аппаратуры управление в автоматизированном и ручном режимах может быть местным (аппаратура управления устанавливается непосредственно у оборудования) либо дистанционным. Местное управление необходимо для ввода системы в автоматический режим для проведения проверочных, наладочных и ремонтных работ. При этом блокировка и сигнализация, необходимые для защиты оборудования, должны действовать в местном режиме.

### 1.1.5. Автоматизированная система управления (уровни управления)

Эффективность работы предприятия (производительность труда, качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции и т. п.) предполагает возможность оперативного доступа и воздействия к информации разнородного происхождения (технологической, бизнес-процессов) из любой точки промышленной системы, т. е. из любого уровня иерархии объекта управления.

Учитывая иерархичность структуры промышленной системы (предприятия) (см. 1.1.1.2), эта задача решается на основе многоуровневой автоматизированной системы управления (АСУ), представленной на рис. 1.9.

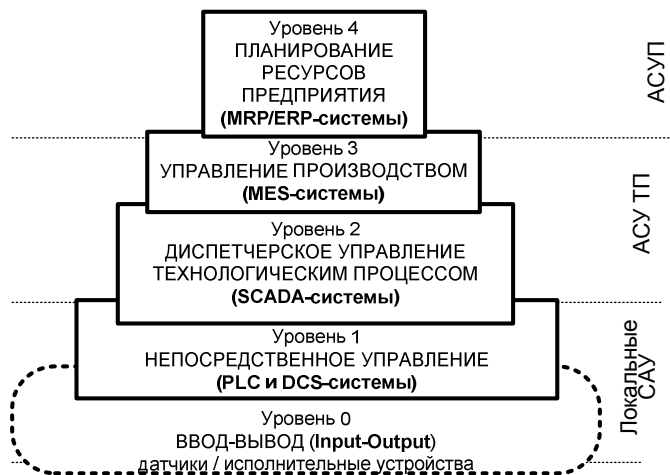
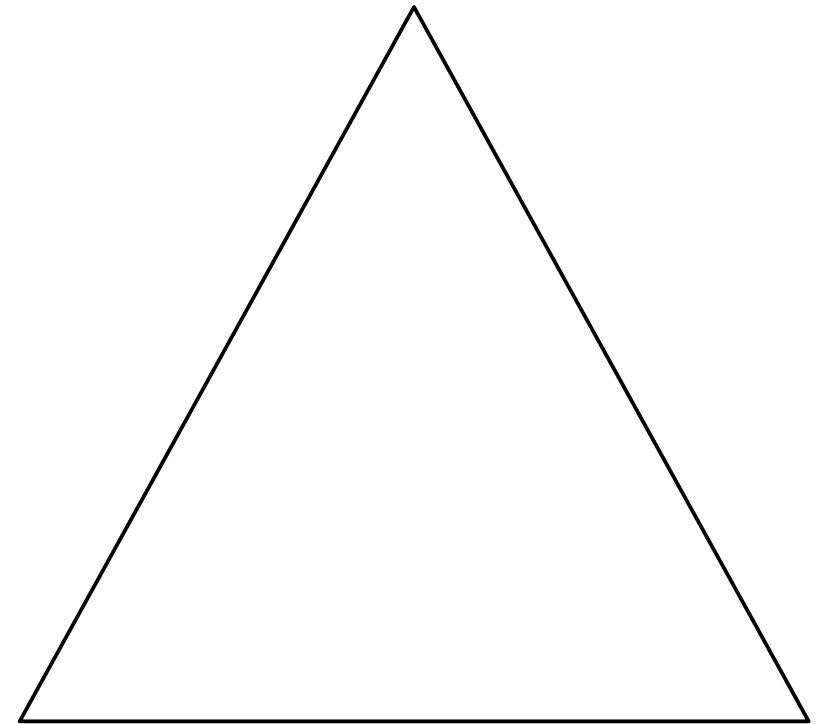


Рис.1.9. Уровни интегрированной и распределенной АСУ

**Нулевой уровень** (уровень I/O –input/output – ввода/вывода). Включает набор первичных преобразователей (датчиков) (см. 2.2), исполнительных механизмов (см. 2.4.1) и регулирующих органов (см. 2.4.2), встраиваемых в конструктивные узлы технологического оборудования и предназначенных, соответственно, для *ввода* первичной (технологической) информации и *вывода* (реализации) управляющих воздействий.



**Первый уровень** (*control – непосредственное управление*). Служит для непосредственного автоматического управления локальными технологическими процессами: PLC-системы – для программного управления дискретными процессами (см. 5.2.1) и DCS (Distributed Control System, распределенная система управления (PCU)) – для управления непрерывными процессами (см. 5.2.2) с помощью промышленных контроллеров PLC (см. 2.3).

Необходимость обмена информацией между нулевым и вторым уровнями в темпе реального процесса накладывает достаточно жесткие ограничения на этот режим. Характеризуется следующими показателями:

- предельно высокой реактивностью режимов реального времени;
- возможностью функционирования в цеховых условиях, т. е. предельной надежностью (на уровне надежности основного оборудования);
- возможностью автономной работы при отказах комплексов управления верхних уровней.

В PLC загружаются программы и данные из компьютеров второго уровня (SCADA-уровень), например, задания (уставки), обеспечивающие координацию и управление агрегатом по критериям оптимальности управления в целом, а на второй выводится оперативная, диагностическая и служебная информация, т. е. данные о состоянии агрегатов, технологического процесса.

**Второй уровень** (*SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition – сбор данных и диспетчерское управление*). Предназначен для отображения (визуализации) данных о производственном процессе и оперативного комплексного управления различными агрегатами при участии диспетчерского персонала (см. 5.3).

**Третий уровень** (*MES – Manufacturing Execution System – производственная исполнительная система*). Выполняет упорядоченную обработку информации о ходе изготовления продукции в цехе, а также является источником необходимой информации в реальном времени для верхнего уровня управления предприятием – планирования ресурсов предприятия (MRP и ERP-уровни) и оптимизации управления ресурсами цеха как единого организационно-технологического объекта по заданиям, поступающим с верхнего уровня (см. 5.4).

**Четвертый уровень** (*MRP – Manufacturing Resource Planning и ERP – Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предпри-*

*ятия*). Предназначены для автоматизации планирования производства и финансовой деятельности, снабжения и продаж, анализа и прогнозирования и т. д.

Задачи, на этом уровне, отличаются главным образом повышенными требованиями к ресурсам (например, для ведения единой базы данных, планирования и управления на уровне предприятия в целом, автоматизации обработки информации в основных и вспомогательных административно-хозяйственных подразделениях предприятия: бухгалтерский учет, материально-техническое снабжение и т. п.). Обычно для решения задач данного уровня выбирают универсальные компьютеры, а также многопроцессорные системы повышенной производительности (см. 5.5).

Обмен информацией между первым и вторым уровнями АСУ осуществляется на основе локальных промышленных сетей (Profibus, Bitbus и т. п.). Компьютеры второго уровня и выше объединяются в однородную локальную сеть предприятия (типа Industrial Ethernet) (см. 2.1). Прямая связь объекта управления и системы управления осуществляется через уровень ввода-вывода (рис. 1.10).

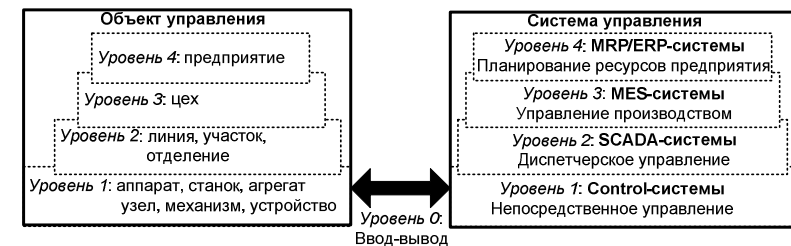


Рис.1.10. Соответствие уровней объекта управления и АСУ



## 1.2. Способы описания САУ

Раздел 1.1. был посвящен ключевым понятиям, позволяющим качественно уяснить суть процесса автоматического управления. Однако этого вовсе не достаточно, чтобы количественно рассчитать САУ. Для этих целей используют специальный математический аппарат.

### 1.2.1. Математическое описание САУ

Математическое описание САУ (являющуюся по сути динамической системой) является предпосылкой для *количественной* оценки ее работы и функционирования.

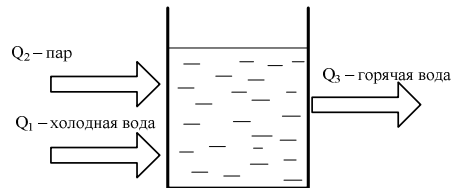
Динамические характеристики (т.е. зависимость изменения выходной переменной  $y$  во времени  $t$  при известном законе изменения входной переменной  $x$ ) САУ и её элементов могут быть описаны:

- а) дифференциальными уравнениями (см. 1.2.1.1.);
- б) передаточными функциями (см. 1.2.1.2.);
- в) временными характеристиками (см. 1.2.1.3.);
- г) частотными характеристиками (см. 1.2.1.4.).

#### 1.2.1.1. Математическое описание САУ с помощью дифференциальных уравнений

Для описания динамических свойств ОУ используют самые разнообразные физические и химические законы и применяют уравнения материального и энергетического балансов.

Поясним это на примере работы теплообменника (ОУ).



Холодная вода, смешиваясь с горячим конденсатом (пар), подается потребителю. На входе ОУ: поток тепла, поступающий с холодной водой  $Q_1$  и паром  $Q_2$ , на выходе: поток тепла с горячей водой  $Q_3$  ( $Q_1$  и  $Q_2$  – количество тепла, поступающее в теплообменник в единицу времени, а  $Q_3$  – количество тепла выходящего с горячей водой).

- а) установившийся режим

$$Q_1 + Q_2 = Q_3; \quad Q_1 + Q_2 - Q_3 = 0;$$

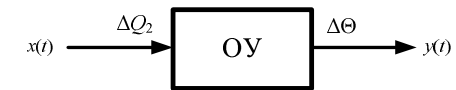
$\Theta = \text{const}$  – температура горячей воды.

- б) переходный режим, возникает при изменении любого (или

всех) теплового потока. В этом случае температура горячей воды  $\Theta$  изменяется, а скорость изменения зависит от величины изменения теплового потока и коэффициента  $A$  – тепловой ёмкости ОУ. Через некоторое время установится новая  $\Theta$  соответствующая балансу тепловых потоков. То есть в переходном режиме:

$$A \frac{d(\Delta\Theta)}{dt} = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 - \Delta Q_3$$

Пусть количество тепла с холодной водой неизменно, то есть  $\Delta Q_1 = 0$ , а его изменение происходит за счёт потока пара  $Q_2$ , т.е.



Так как изменение теплового потока  $\Delta Q_3$  пропорционально изменению температуры горячей воды  $\Delta\Theta$ , её удельной теплоёмкости  $C$  и массе  $m$  ( $\Delta Q_3 = c \cdot m \cdot \Delta\Theta$ ), то

$$A \frac{d(\Delta\Theta)}{dt} + c \cdot m \cdot \Delta\Theta = \Delta Q_2 \quad \frac{A}{c \cdot m} \frac{d(\Delta\Theta)}{dt} + \Delta\Theta = \frac{1}{c \cdot m} \Delta Q_2$$

Введя обозначения:

$T = A/c \cdot m$  – постоянная времени ОУ;

$k = 1/c \cdot m$  – коэффициент передачи ОУ;

$y = \Delta\Theta$ ;  $x = \Delta Q_2$ .

Тогда дифференциальное уравнение запишется

$$T \frac{dy}{dt} + y = k \cdot x \quad \text{т.е. это дифференциальное уравнение 1-го порядка}$$

рядка

На практике математическое описание САУ имеет более высокий порядок и содержит производные, как в левой, так и в правой части.

В общем случае САУ может быть описана линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами вида:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (*)$$

Решение дифференциальных уравнений высокого порядка вызывает значительные трудности. Поэтому применяется форма записи дифференциальных уравнений в виде передаточных функций.

### 1.2.1.2. Математическое описание САУ с помощью передаточных функций

Это особая форма преобразованного по Лапласу дифференциального уравнения. Она проста и удобна т.к. рассматривает не дифференциальное, а алгебраическое уравнение, которое значительно легче преобразовывать и решать.

Преобразование Лапласа позволяют представить функцию вещественного переменного (времени) как функцию комплексного переменного. Это осуществляется с помощью прямого преобразования Лапласа:

$$x(p) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-pt} dt$$

где  $x(t)$  – называют оригиналом;  $x(p)$  – изображением. Если известно  $x(p)$  и требуется найти функцию времени, то оригинал находят по правилу обратного преобразования Лапласа, т.е.

$$x(t) = L^{-1}[x(p)].$$

#### Основные свойства преобразования Лапласа

1. Умножение оригинала на постоянную величину  $a$  соответствует умножению изображения на  $a$  :

$$L[a \cdot x(t)] = a \cdot x(p);$$

2. Суммирование оригиналов соответствует суммированию изображений:

$$L[x_1(t) + x_2(t)] = x_1(p) + x_2(p);$$

3. Дифференцированию оригиналов соответствуют следующие выражения для изображений:

$$L\left[\frac{dx(t)}{dt}\right] = p \cdot x(p) - x(0);$$

$$L\left[\frac{d^2x(t)}{dt^2}\right] = p^2 \cdot x(p) - p \cdot x(0) - x'(0);$$

$$L\left[\frac{d^n x(t)}{dt^n}\right] = p^n \cdot x(p) - [p^{n-1} \cdot x(0) + p^{n-2} \cdot x'(0) + \dots + p \cdot x^{n-2}(0) + x^{n-1}(0)]$$

При нулевых начальных условиях ( $t = 0$ ) выходная величина  $x(0)$  и все её производные  $x'(0) \dots x^{n-1}(0) = 0$ . Тогда:

$$L\left[\frac{d^n x(t)}{dt^n}\right] = p^n \cdot x(p);$$

4. Интегрирование оригинала соответствует делению изображения на  $p$ :

$$L\left[\int x(t) dt\right] = \frac{x(p)}{p};$$

Пользуясь свойством Лапласа 1, 2, 3 при нулевых начальных условиях уравнение (\*) приводится к виду:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

(\*)

$$[a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0] \cdot y(p) = [b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0] \cdot x(p)$$

(\*\*)

Основная трудность не в решении уравнения (оно алгебраическое и единственная трудность – нахождение корней), а в переходе от оригинала к изображению и обратно. Прямое и обратное преобразование Лапласа осуществляют с помощью таблиц оригиналов и изображений [в специальных справочниках].

Уравнение алгебраическое (\*\*) в изображениях несет такую же информацию о динамике системы, как и дифференциальное.

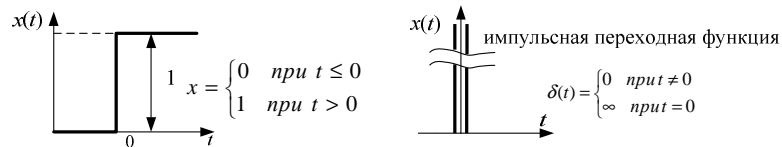
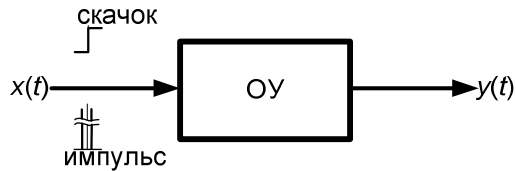
Отношение  $W(p) = y(p)/x(p)$  называют *передаточной функцией*:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0}$$

Передаточные функции получили очень широкое распространение в САУ при расчете систем.

### 1.2.1.3. Математическое описание САУ с помощью временных характеристик

Временная характеристика – зависимость от времени  $t$  выходной переменной  $y(t)$  при подаче на вход объекта управления  $x(t)$  типового воздействия (скачок и импульс).



а) скачок – единичное ступенчатое входное воздействие  $x(t)$ , которое часто возникает в системе при её включении (отключении) и/или резком изменении заданного режима.

Если скачок применен к системе в течение всего времени ее перехода из одного устойчивого состояния в другое, то временную характеристику называют *переходной функцией*, а её графическое изображение – *переходной характеристикой*.

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} \rightarrow y(p) = W(p) \cdot x(p)$$

где  $x(p)$  – скачок на входе  $x(t) = 1(t)$ , учитывая, что изображение ступенчатой функции равно  $1/p$ , получим:

$$y(p) = W(p) \cdot \frac{1}{p}$$

Для отыскания оригинала (т.е. значение во временной области) используют специальные таблицы.

б) импульс – мгновенное (кратковременное) изменение входного воздействия  $x(t)$ . Используется для имитации возмущающего воздействия на систему. Для его описания используют  $\delta$ -функции.

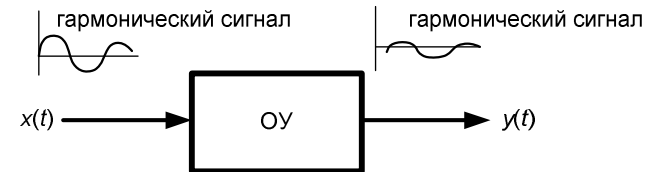
### 1.2.1.4. Математическое описание САУ с помощью частотных характеристик

Для определения динамических свойств системы на ее вход подают гармонические колебания вида

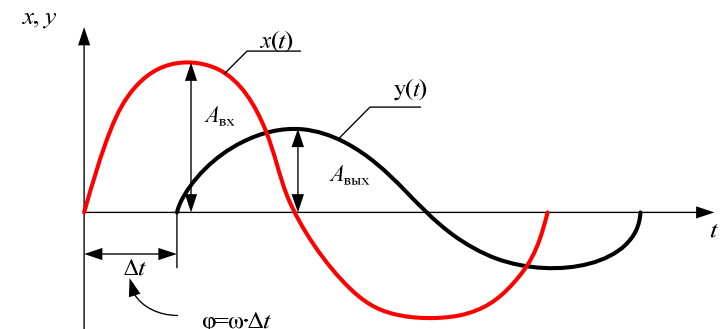
$$x(t) = A_{\text{вх}} \sin(\omega \cdot t);$$

где

$A_{\text{вх}}$  – амплитуда входных колебаний;  
 $\omega$  – угловая частота колебаний;  
 $t$  – время.



Если САУ линейная, то на её выходе также устанавливаются синусоидальные колебания с частотой  $\omega$ , но с амплитудой  $A_{\text{вых}}$  и сдвинутые по фазе относительно входного сигнала на угол  $\varphi$ :



$$y = A_{\text{вых}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi);$$

Параметры  $A_{\text{вых}}$  и  $\varphi$  зависят от частоты и амплитуды входных сигналов и динамических свойств системы. Знак «минус» перед  $\varphi$  обусловлен тем, что в реальных системах выходное колебание отстает по фазе от входного.

Запишем переменные  $x$  и  $y$  в комплексной форме:

$$x(t) = A_{\text{вх}} \sin(\omega \cdot t) = A_{\text{вх}} \cdot e^{j\omega t} \quad j\omega \equiv p$$

$$y(t) = A_{\text{вых}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = A_{\text{вых}} \cdot e^{j(\omega t - \varphi)} \quad j = \sqrt{-1}$$

тогда

$$\frac{y_{\text{вых}}(t)}{x_{\text{вх}}(t)} = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}} \cdot e^{-j\varphi}$$

Поведение динамической системы характеризуют частотные характеристики.

Амплитудно-фазовая характеристика  $W(\omega)$  (АФХ)

**Пример.** Построить АФХ для динамической системы, описываемой передаточной функцией вида  $W(p) = \frac{k}{Tp+1}$ .

Проводим замену  $p$  на  $j\omega$

$$\frac{y(p)}{x(p)} = \frac{k}{Tp+1} = \frac{k}{Tj\omega+1}$$

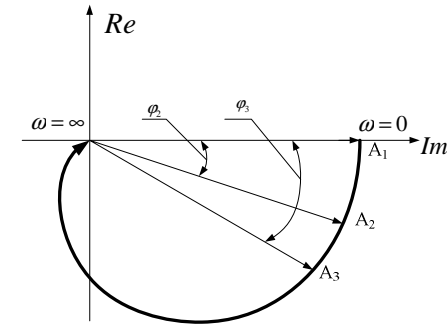
Выделяем действительную  $Re$  (real) и мнимую  $Im$  (image) части. Для этого умножаем числитель и знаменатель на комплексно-сопряженный множитель  $(Tj\omega - 1)$

$$W(\omega) = \frac{k}{Tj\omega+1} \cdot \frac{Tj\omega-1}{Tj\omega-1} = \frac{k \cdot Tj\omega - k}{-T^2 \cdot \omega^2 - 1} \cdot \frac{-1}{-1} = \frac{+k}{T^2 \cdot \omega^2 + 1} - j \frac{k \cdot T \cdot \omega}{T^2 \cdot \omega^2 + 1}$$

$$Re(\omega) = \frac{k}{T^2 \cdot \omega^2 + 1} ;$$

$$Im(\omega) = -j \frac{k \cdot T \cdot \omega}{T^2 \cdot \omega^2 + 1} .$$

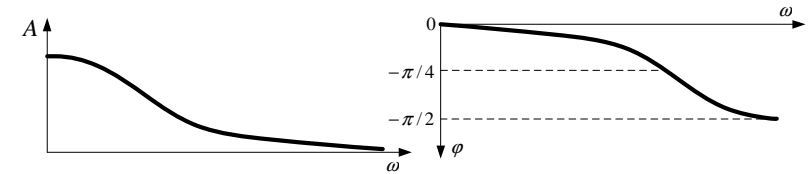
Задаваясь изменением частоты  $\omega$  от 0 до  $n$  строится АФХ



$$A = \sqrt{Re^2(\omega) + Im^2(\omega)} \text{ – амплитуда}$$

$$\varphi = \arctg \frac{Im(\omega)}{Re(\omega)} \text{ – фаза.}$$

На основе этих формул строится амплитудно-частотная  $A(\omega)$  (АЧХ) и фазово-частотная  $\varphi(\omega)$  (ФЧХ) характеристики.



### 1.2.2. Типовые динамические звенья САУ

При расчёте САУ (анализе и синтезе) ее разбивают на отдельные части (блоки, звенья), у которых математическая зависимость между входными  $x$  и выходными  $y$  переменными и временем  $t$  описывается дифференциальными уравнениями не выше 2-го порядка (их называют типовыми элементарными динамическими звеньями).

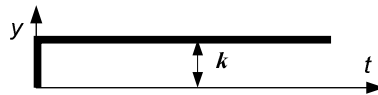
Таким образом, элементы различной физической природы могут быть представлены в виде одинаковых динамических звеньев (если их свойства описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями).

На практике используют 6 основных типовых элементарных динамических звеньев:

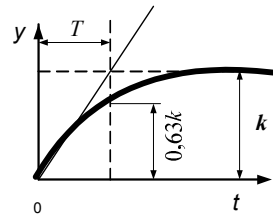
1. усилительное;
2. апериодическое ;
3. колебательное;
4. интегрирующее;
5. дифференцирующее;
6. чистого запаздывания.

1) *усилительное звено* – передача сигнала без замедлений и ускорений во времени, т.е. переходные процессы отсутствуют.

$W_{yc}(p) = k$  – коэффициент усиления (числовая величина).



2) *апериодическое звено*

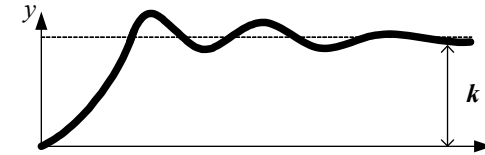


$$W_{\text{апериод}}(p) = \frac{k}{Tp + 1};$$

где  $k$  – коэффициент усиления,  $T$  – постоянная времени (имеет размерность времени).

3) *колебательное звено*

$$W_{\text{кол}}(p) = \frac{K}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1};$$



$T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени (при  $T_2 = 0$  превращается в апериодическое звено).

В зависимости от соотношения между  $T_1$  и  $T_2$  корни характеристического уравнения  $T_2^2 p^2 + T_1 p + 1 = 0$  будут вещественными, мнимыми или комплексно-сопряженными:

при  $T_1 > 2T_2 \rightarrow$  корни вещественные;

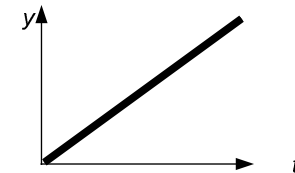
при  $T_1 = 2T_2 \rightarrow$  одинаковые вещественные корни, а переходные процессы протекают апериодически и звено не является колебательным (м.б. представлено в виде последовательного соединения двух апериодических звеньев);

при  $T_1 < 2T_2 \rightarrow$  корни уравнения комплексные (колебательный процесс);

при  $T_1 = 0 \rightarrow$  незатухающие колебания.

4) *интегрирующее звено* – выходная величина пропорциональна  $\int$  от входной.

$$W_{\text{инт}}(p) = \frac{k}{Tp}$$

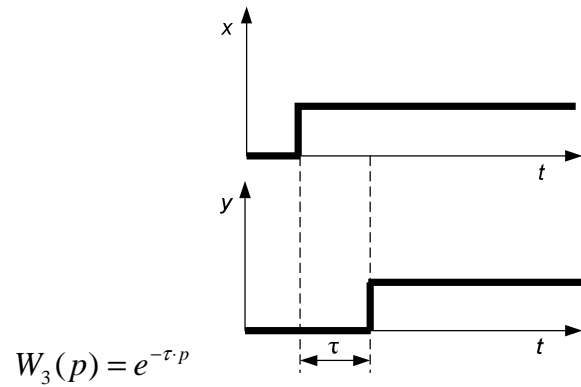


5) дифференцирующее звено

$W_{\text{диф}}(p) = kp$  – идеальное дифференцирующее звено. На практике невозможно, т.к. все реальные процессы инерционны, а по этому уравнению скачкообразное изменение входной величины должно вызвать мгновенное изменение выходной от 0 до  $\infty$  и немедленный спад до 0.

$$W_{\text{диф}}(p) = \frac{kTp}{Tp + 1} \text{ – идеальное дифференцирующее звено.}$$

б) запаздывающее звено – воспроизводит изменение входной величины без искажений, но с постоянным запаздыванием на время  $\tau$ .



### 1.2.3. Структурные схемы САУ и их преобразования /соединения/

Передаточные функции отдельных блоков (звеньев) на основе типовых элементарных динамических звеньев (см. 3.1) образуют структурную схему САУ, являющуюся динамической моделью системы. Т.е. для её получения надо каждый элемент САУ заменить соответствующим динамическим звеном и соединить в той же последовательности.

Графически структурная схема изображается в виде прямоугольников, внутри которых записываются передаточные функции звеньев. Связи между звеньями обозначаются линиями со стрелками, указывающими направление передачи информации.

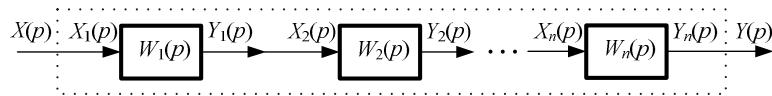


а) в общем виде; б) конкретизировано: аperiodическое звено 1-го порядка

Звенья, образующие структурные схемы, могут быть соединены:

- а) последовательно;
- б) параллельно;
- в) с обратной связью.

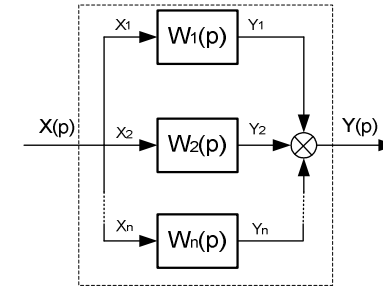
*Последовательное соединение звеньев* – выход каждого звена связан с входом следующего.



$$\begin{aligned} Y_1(p) &= W_1(p) X_1(p) \\ X_2(p) &= Y_1(p) \\ Y_2(p) &= W_2(p) X_2(p) \text{ и т.д.} \end{aligned}$$

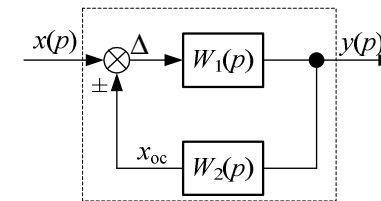
$$W_{\text{посл}}(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) = W_1(p) W_2(p) \dots W_n(p);$$

*Параллельное соединение звеньев* – входные сигналы на все звенья одинаковы  $X(p) = X_1(p) = X_2(p) = \dots = X_n(p)$ , а выходящий равен сумме выходных сигналов  $Y(p) = Y_1(p) + Y_2(p) + \dots + Y_n(p)$ .



$$W_{\text{парал}}(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p) = W_1(p) + W_2(p) + \dots + W_n(p);$$

*Соединение звеньев с обратной связью* – выходной сигнал посредством обратной связи возвращается на вход системы.



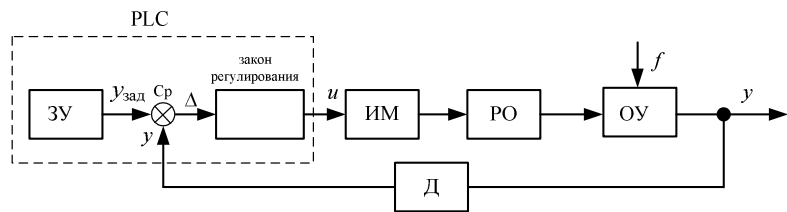
$$W_{oc}(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p) W_2(p)};$$

В этой формуле знак «плюс» соответствует отрицательной обратной связи, а знак «минус» – положительной. Для вывода уравнения соединения с ОС составляется система уравнений (случай с отрицательной обратной связью) и решается относительно соотношения  $y(p)/x(p)$

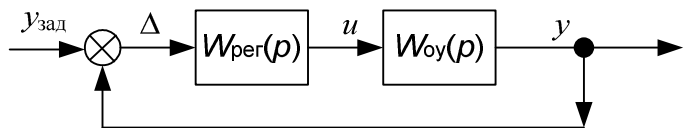
$$\begin{cases} y = W_1 \Delta \\ \Delta = x - x_{oc} \\ x_{oc} = W_2 y \end{cases}$$

Пользуясь тремя вышеперечисленными правилами преобразования, можно получить передаточную функцию САУ любой сложности или наоборот упростить структурные схемы в целом и тем самым проанализировать ее работу. Например

а) исходная система



б) преобразованная система



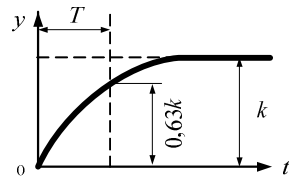


### 1.2.4. Динамические свойства непрерывных объектов управления

При всём разнообразии непрерывных ОУ большинство их может быть выделено в группу, которая обладает аналогичными динамическими свойствами: а) емкостью ОУ; б) самовыравниванием ОУ; в) запаздыванием ОУ.

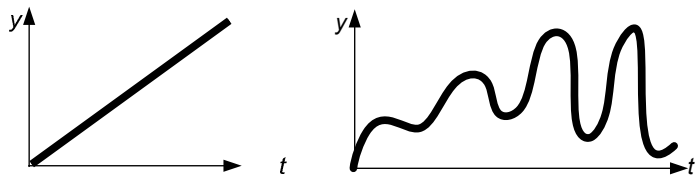
а) *емкость ОУ* – характеризует его инерционность, т.е. степень влияния входной переменной на скорость изменения выходной. Многие ОУ обладают способностью аккумулировать рабочую среду, запастись её внутри себя – эта способность называется аккумулирующей способностью или ёмкостью объекта.

$$W_{OY}(p) = \frac{k}{Tp + 1}$$



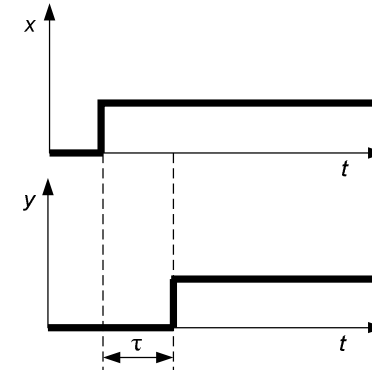
Емкость (инерционность) ОУ характеризуется постоянной времени  $T$ .

б) *самовыравнивание ОУ* – характеризует его устойчивость, т.е. способность ОУ самостоятельно приходить после нанесения возмущения в новое установившееся состояние. Отсутствие самовыравнивания ухудшает возможности управления объектом. Самовыравнивание – результат отрицательной внутренней обратной связи, т.е. влияния управляемой переменной  $y$  на приток и расход вещества или энергии. Если ОУ не обладает самовыравниванием, то после приложения возмущения управляемая переменная неограниченно возрастает или убывает (астатические ОУ).



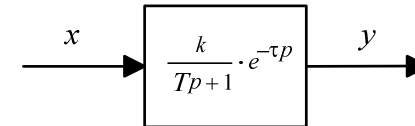
в) *запаздывание ОУ* – характеризует его способность (после нане-

сения управления  $u$  или возмущения  $f$ ) не сразу реагировать на изменение, а через некоторый промежуток  $\tau$ . Все реальные ОУ обладают запаздыванием, которое неблагоприятно сказывается на возможности управлять объектом.

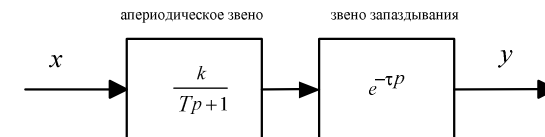


*Пример.*

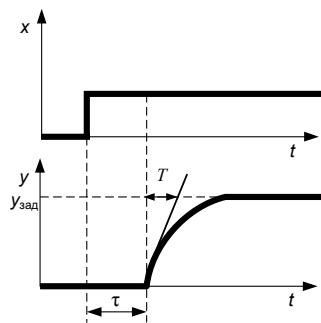
Очень часто промышленный объект по каналу управления описывается следующей передаточной функцией



Как видно, это два типовых динамических звена (апериодическое и запаздывания), соединенных последовательно



Апериодическое звено несет информацию о емкости  $T$  (инерционности) ОУ, а запаздывания – о задержке (сдвиге) информации на определенный интервал времени  $\tau$ . Динамическая характеристика хорошо иллюстрирует эти два важных свойства ОУ ( $T$  и  $\tau$  имеют размерность времени).

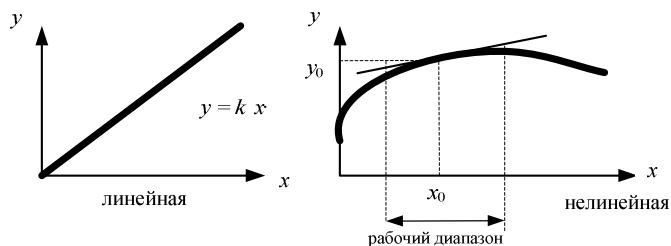


### 1.2.5. Статические и динамические характеристики САУ

Работу любой САУ в установившемся и переходном режимах можно описать на основе характеристик: а) статических (установившийся режим); б) динамических (переходный режим).

а) *статическая характеристика* – зависимость выходного параметра  $y$  от входного  $x$  в установившемся режиме, т.е.  $y = f(x)$

Так как большинство реальных ОУ обладают нелинейными статическими характеристиками, то на практике проводят их линеаризацию, т.е. заменяют линейными. Линеаризация возможна в случае, если статическая характеристика непрерывна и имеет непрерывное изменение производной во всём диапазоне.



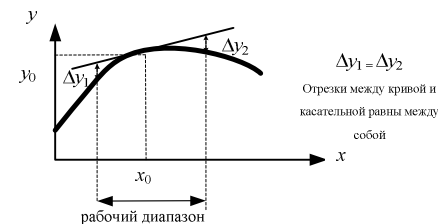
Для линеаризации нелинейной функции  $y = f(x)$  её раскладывают в окрестности значения входной переменной  $x_0$  в ряд Тейлора:

$$y = f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \dots + \frac{f^n(x_0)}{n!}(x - x_0)^n$$

и приближенно заменяют двумя первыми членами

$$y \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

т.е. кривую  $y$  заменяют прямой касательной к ней в точке  $x_0$  с наклоном, соответствующим  $f'(x_0)$ .



При задании статической характеристики графически для её линеаризации в рабочей точке  $x_0$  проводят касательную так, чтобы  $\Delta y_1 = \Delta y_2$  в диапазоне реальных изменений входной величины.

б) *динамическая характеристика* – зависимость изменения выходной переменной  $y$  во времени  $t$  при известном законе изменения входной переменной  $x$ . Динамические характеристики САУ её элементов могут быть описаны (см. тему «Математическое описание САУ»):

- дифференциальными уравнениями;
- передаточными функциями;
- временными характеристиками;
- частотными характеристиками.

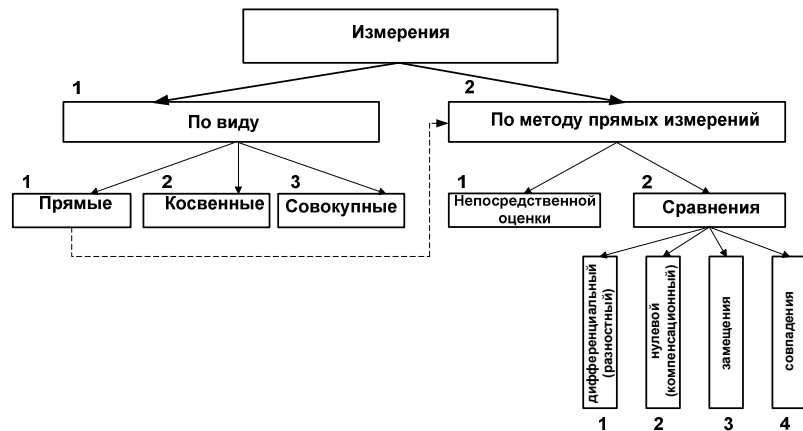
### 1.3. Измерения и методы измерений

#### 1.3.1. Классификация измерений и погрешности измерений

**Классификация измерений.** Измерение – процесс нахождения значения исследуемой величины опытным путём с помощью специальных технических средств.

Измерения – один из основных способов познания природы. Это предпосылка и составная часть любого исследования: прежде чем управлять, надо измерить.

Измерения классифицируют:



1.1. *Прямые* – результат определяют непосредственным сравнением измеряемой величины с единицей измерения. Приборы, осуществляющие прямые измерения (мерные линейки, сосуды, термометры и т.д.), заранее градуируют в выбранных единицах.

1.2. *Косвенные* – результат определяют на основании прямых измерений нескольких, связанных с измеряемой величиной определенной зависимостью. (Пример: а) Измерить сопротивление участка цепи  $R$  по известным току  $I$  и напряжению  $U \rightarrow R=U/I$ ; б) измерить расход жидкости по перепаду давления  $\rightarrow Q = \alpha \sqrt{\frac{2g}{\rho} \cdot \Delta p}$ .

1.3. *Совокупные* – результат определяют на основании решения ряда уравнений, полученных из совокупности прямых измерений одной или нескольких прямых величин. (Пример: Определить темпера-

турные коэффициенты линейного расширения  $\alpha$  и  $\beta$  из уравнения (дано при  $T=20^\circ C$ )

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t-20) + \beta(t-20)^2]$$

Вначале надо измерить  $R_t$  хотя бы при двух значениях температуры  $t$ , затем определить  $\alpha$  и  $\beta$  из системы двух квадратных уравнений.

2.1. *Непосредственная оценка* – измеряемая величина определяется и оценивается целиком, т.е. приборы непосредственно показывают измеряемую величину и градуируются в её единицах.

2.2. *Сравнения*

2.2.1 Дифференциальный метод (или разностный) – измеряемая величина  $Q$  находится после определения разности между измеряемой величиной  $Q$  и некоторой известной (образцовой, эталонной) величиной  $U$

$$A = Q - U \quad \text{тогда} \quad Q = a + U.$$

Метод тем точнее, чем меньше отношение  $a/Q$ .

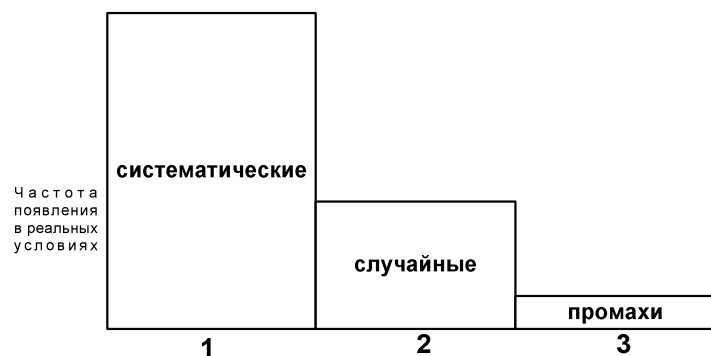
2.2.2. Нулевой метод (компенсационный) – частный случай дифференциального метода, когда  $Q - U = 0$  (т.е.  $a = 0$ ). В этом случае образцовая величина  $U$  – переменная. Точность метода зависит от точности отсчёта величины  $U$  и от чувствительности приборов, с помощью которых определяется, что  $a = 0$ . Применяется при измерении температуры автоматическими потенциометрами.

2.2.3. Метод замещения- разность не вычисляют, измеряемую величину  $Q$  замещают величиной  $U$ , которая в общем случае может иметь другую физическую природу. Величина  $U$  – переменная. Метод наиболее точен. Применяется для научных исследований.

2.2.4. Метод совпадения – измеряемую величину  $Q$ , представленную в виде равномерно чередующихся сигналов, сопоставляют с рядом сигналов, соответствующих образцовой величине  $U$ . Применяется для обработки диаграмм и осциллограмм, когда записанную измеряемую величину сравнивают с показаниями отметчика времени, определяя частоту следования измеряемой величины.

**Погрешности измерений.** На практике измеряемая величина всегда имеет приближённое значение. Поэтому результатами измерений можно пользоваться тогда, когда известна степень достоверности проведённого измерения, количественным выражением которой является погрешность измерения.

Погрешности классифицируют (признак: по порождающим их причинам):



1. *Систематические погрешности* – такие, природа и характер которых известны. Чаще появляются при повторных измерениях. Могут быть постоянными, периодическими или меняющимися по определённому закону. Односторонне влияют на результат измерения, увеличивая или уменьшая его. Обнаружить и устранить такие погрешности часто нелегко. Причины появления:

- неточности самих методов измерения;
- недостатки конструкции приборов (зазоры, влияние сил трения, неточность изготовления отдельных элементов приборов).

2. *Случайные погрешности* – возникают под воздействием непостоянных факторов, не связанных с процессом измерения. Их влияние не может быть определено заранее. Случайные погрешности подчиняются законам теории вероятности. Причины появления:

- влияние условий окружающей среды;
- субъективные ошибки отсчёта.

3. *Промахи* – чрезмерно большие погрешности (аномальные), которые явно искажают результат измерения. Причины появления:

- неправильная эксплуатация прибора;
- неправильное подключение к объекту контроля.

### 1.3.2. Классификация измерительных приборов

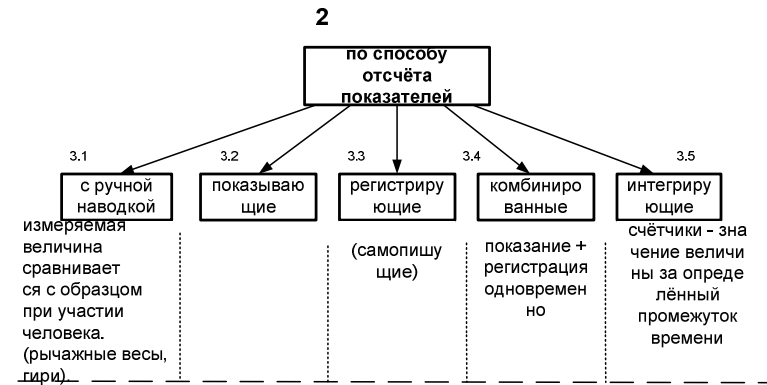
Признаки классификации средств контроля весьма разнообразны:



Рассмотрим каждую из трех групп подробнее.

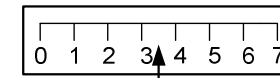


состояние прибора и условия измерения.			
--	--	--	--

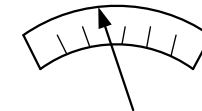


3.2. Показывающие приборы – значение измеряемой величины в процессе измерения указывается на отсчётном устройстве (шкала с указателем).

Наиболее типичные шкалы:



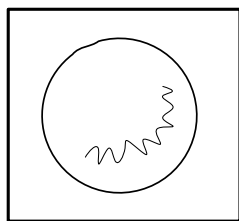
прямолинейная



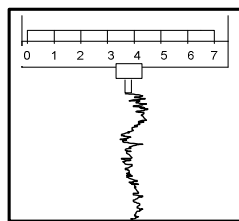
дуговая

3.3. Регистрирующие приборы – записывают (непрерывно или дискретно) на бумажной ленте или диске с помощью пера или печатающей каретки значения измеряемой величины. Могут быть: одноточечными, многоточечными (обегающее устройство).

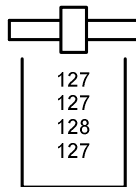
Наиболее типичные формы регистрации:



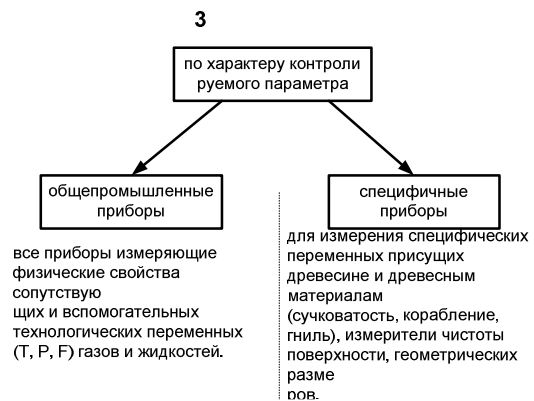
В полярных координатах



В прямоугольных координатах



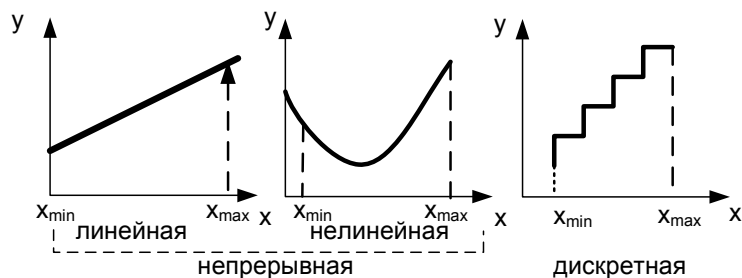
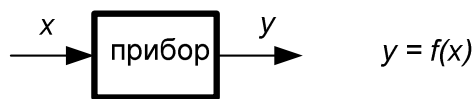
С печатающим устройством



### 1.3.3. Метрологические характеристики измерительных приборов и устройств

Основные метрологические требования к измерительному прибору: точность и формирование полезного сигнала с минимальными искажениями. Это в свою очередь зависит от статических и динамических характеристик (а также влияния возмущающих переменных). [P.S. Точность управления не может быть выше точности измерения]

1. Статистическая характеристика измерительного прибора – функциональная связь между изменениями входного сигнала  $x$  и изменением выходного сигнала  $y$ .

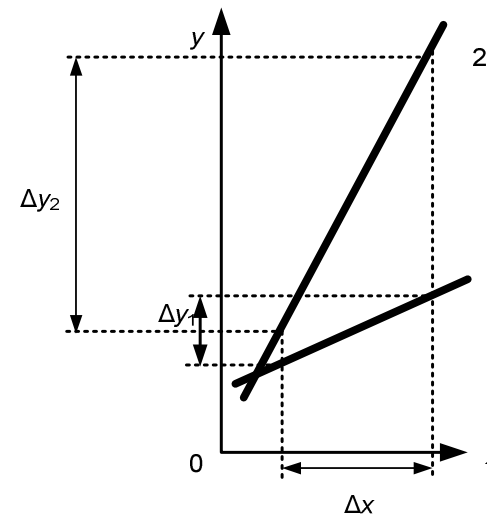


Типичные статические характеристики

Из статической характеристики можно определить чувствительность  $S$  измерительного прибора.

Чувствительность  $S$  – отношение изменения выходной величины  $\Delta y$  к соответствующему изменению входной  $\Delta x$ :

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$



Прибор, имеющий статическую характеристику 2, имеет значительно более высокую чувствительность, чем 1, т.к. при одинаковом знаменателе  $\Delta x$  в формуле определения чувствительности  $S$ , его числитель больше ( $\Delta y_2 > \Delta y_1$ )

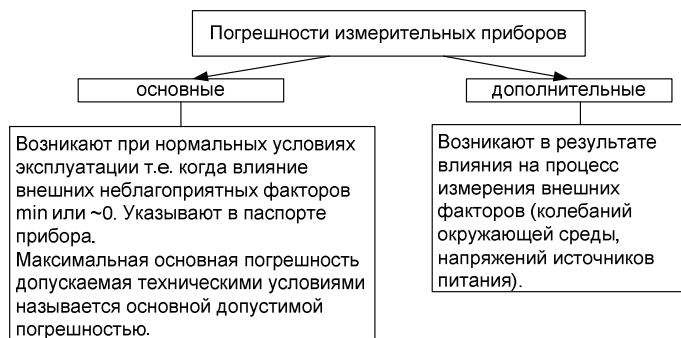
Для линейных устройств  $S$  – постоянна, для нелинейных  $S$  – характеризует угол наклона касательной к статической характеристике (называется крутизной статической характеристики, или коэффициентом усиления устройства)

Порог чувствительности – минимальное изменение измеряемой величины (входа), способное вызвать появление изменения выходного сигнала.

Показания, получаемые с помощью измерительных приборов в статических условиях измерения, есть лишь приближенные числовые значения действительной измеряемой величины. Степень приближения к истинному значению зависит, кроме всех прочих условий, от класса точности приборов. Понятие класса точности прибора, как обобщенной метрологической характеристики приборов связано с погрешностью измерительных приборов.

Погрешности измерительных приборов подразделяются:





Погрешность измерительных приборов количественно выражается в абсолютных (абсолютная погрешность) и относительных величинах (относительная и относительная приведенная погрешности).

Абсолютная погрешность  $\Delta$  – разность между показаниями измерительного прибора  $Q$  и действительным (истинным, эталонным) значением измеряемой величины  $Q_0$ .

$$\Delta = Q - Q_0 \quad [\text{единицы измерения параметра}]$$

Относительная погрешность  $\delta_{от}$  определяется как отношение

$$\delta_{от} = \frac{\Delta}{Q_0} \cdot 100\% \quad [\%]$$

Относительная приведенная погрешность  $\delta_{пр}$  определяется как

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta}{Q_{кон} - Q_{нач}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$Q_{кон} - Q_{нач}$  – диапазон шкалы измерительного прибора (используется на практике!)

Для сравнения метрологических возможностей измерительных средств используют основные допустимые погрешности по которым назначаются классы точности приборов.

Класс точности  $\gamma$

$$\gamma = \frac{\Delta}{\text{диапазон}_\text{шкалы}} \cdot 100\%$$

Измерительные средства имеют следующие классы точности

$$\gamma = [1; 1.5; 2; 2.5; 4; 5; 6] \cdot 10^n$$

где  $n = +1, 0, -1, -2$  и т.д.

Класс точности: а) образцовые приборы  $0.15 \div 0.4$

б) реальные приборы  $0.5 \div 4$

На измерительных приборах класс точности обозначается (без кружка и с кружком):

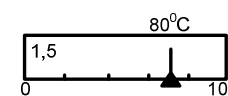
1,5



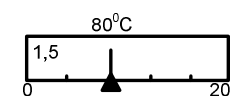
по приведенной относительной погрешности

по относительной погрешности

Пример. В приборах одинакового класса точности абсолютная погрешность  $\Delta$  меньше у прибора с меньшим диапазоном шкалы

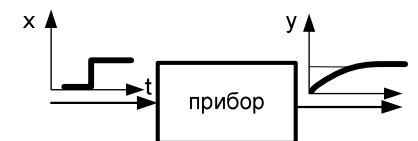


$$1.5 = \frac{\Delta}{100} \cdot 100\% \\ \Delta = 1.5^\circ\text{C} \\ \text{т.е. } 80^\circ \pm 1.5^\circ\text{C}$$



$$1.5 = \frac{\Delta}{200} \cdot 100\% \\ \Delta = 3^\circ\text{C} \\ \text{т.е. } 80^\circ \pm 3^\circ\text{C}$$

**2. Динамическая характеристика измерительного прибора** – функциональная зависимость изменение показания прибора от времени при однократном максимальном изменении измеряемой величины.



Динамическая погрешность прибора – разность между показаниями измерительного прибора и действительным значением измеряемой величины, взятая по времени переходного процесса.

### 1.3.4. Измерительные схемы САК

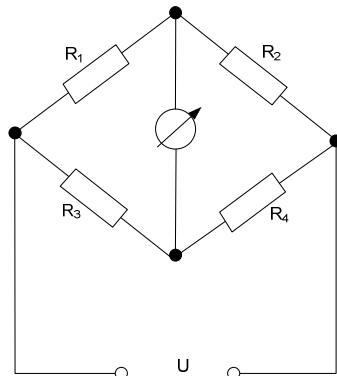
В основном выходная величина у датчиков является электрической. Однако её не всегда можно измерить непосредственно прибором (сопротивление, ёмкость). Поэтому её преобразовывают в другой вид электрической величины удобный для измерения.

Существуют следующие схемы, осуществляющие такое преобразование:

- мостовая;
- компенсационная измерительные схемы.

#### 1.3.4.1. Мостовая измерительная схема

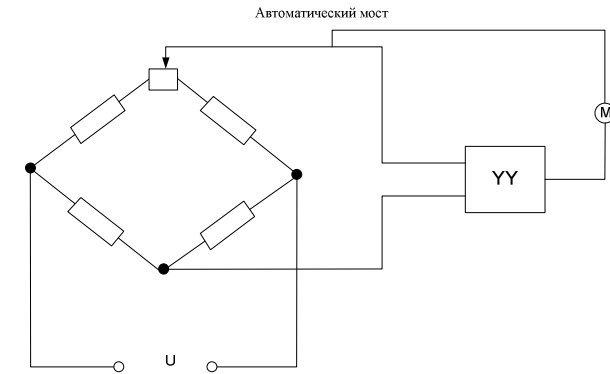
Принцип: измеряемая величина преобразуется датчиком в изменение активного или реактивного сопротивления.



Принципиальная схема, в одной диагонали: источник постороннего напряжения, в другой: измерительный прибор.

Условие равновесия мостовой схемы:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

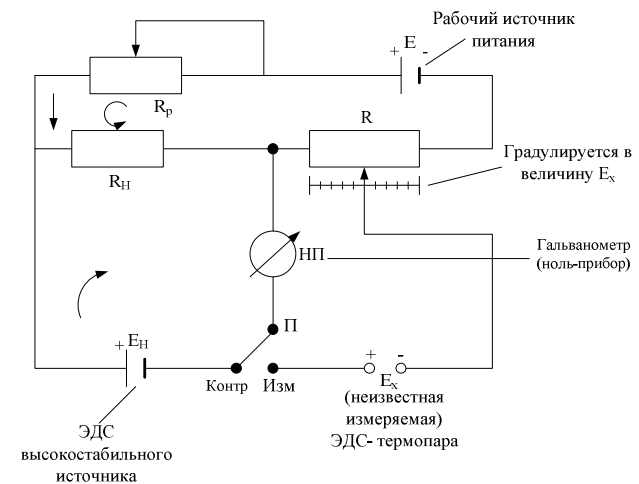


Всё время поддерживается равновесие

#### 1.3.4.2. Компенсационная измерительная схема

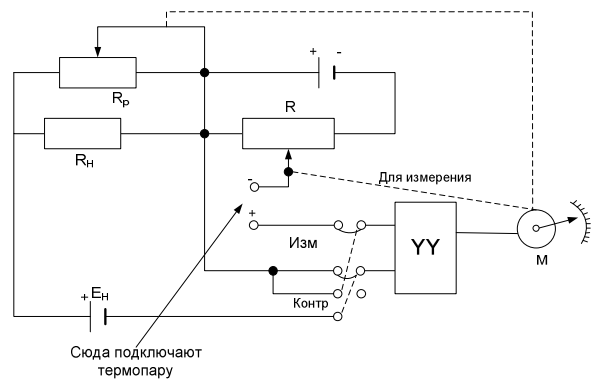
Принцип: уравнивание (компенсация) неизвестной ЭДС датчика известным падением напряжения на тарированном сопротивлении.

Схема



- Контроль для установки рабочего тока
- Непосредственно измерение.

Мостовые и компенсационные схемы измерений очень широко применяются в САУ в связи с их высокой точностью.

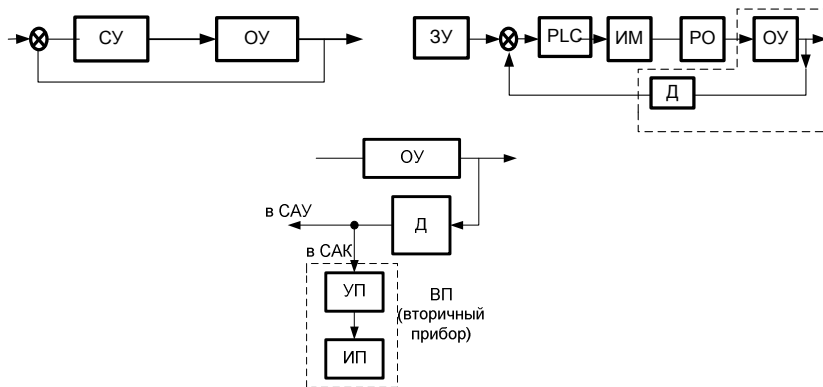


### Вторичные приборы

К ним относятся устройства воспринимающие сигнал от датчика и преобразующие его в перемещение указателя относительно шкалы. Они могут также осуществлять запись (регистрацию) контролируемой величины на специальной диаграммной бумаге, а также сигнализацию при достижении параметра или максимального значения.

### 1.3.5. Структура и классификация систем автоматического контроля

Рассмотрим общую структурную схему САУ и выделим в ней часть, относящуюся к системе автоматического контроля (САК).

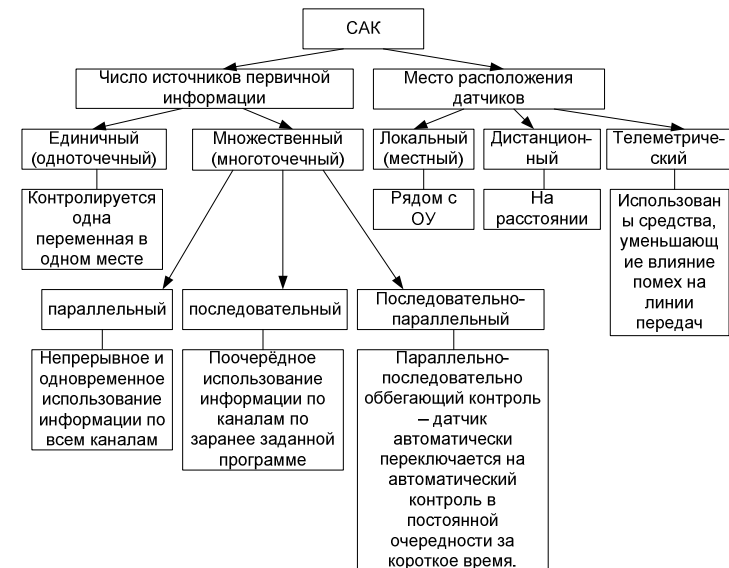


Информация с выхода датчика (первичного преобразователя) по-

падает на вторичный прибор ВП (вторичный преобразователь) состоящий:

- УП (усилительно-преобразовательное устройство) – для усиления сигнала, а при необходимости для преобразования в другой вид сигнала, удобный для дальнейшего использования;
- ИП (измерительный преобразователь) – для преобразования полученного сигнала в перемещение указателя показывающего, или записывающего результат измерения прибора.

Типовые САК подразделяются:



## 1.4. Схемы автоматизации

### 1.4.1. Функциональные схемы автоматизации

#### 1.4.1.1. Назначение

Функциональные схемы автоматизации (ФСА) являются основным техническим документом, определяющим функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса и оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации (РМ4-4-85. «Руководящие материалы по проектированию систем автоматизации технологических процессов»)

Задачи, решаемые при разработке ФСА технологических процессов:

- получение первичной информации о состоянии технологического процесса и оборудования;
- непосредственное воздействие на технологический процесс для управления им;
- стабилизация технологических параметров процесса;
- контроль и регистрация технологических параметров процесса и состояния технологического оборудования.

Указанные задачи решаются на основании анализа условий работы технологического оборудования, выявленных законов и критериев управления объектом, а также требований, предъявляемых к точности стабилизации, контролю и регистрации технологических параметров, к качеству регулирования и надежности.

Представляет собой чертеж, на котором условными обозначениями совмещены и изображены два «слоя» (рис. 2.3):

- *технологический* – объекты управления (т. е. технологические установки, аппараты, агрегаты и т.п.) и связывающие их коммуникационные потоки (по сути это материальные потоки). Формируется на основе схемы материальных потоков и их информационных переменных;
- *автоматизации* – средства автоматизации (датчики, приборы, вычислительные устройства, промышленные контроллеры и компьютеры и т.п.) с указанием связей между ними и технологическим оборудованием, а также связей между отдельными элементами автоматики. Формируется на основе структурной схемы САУ.

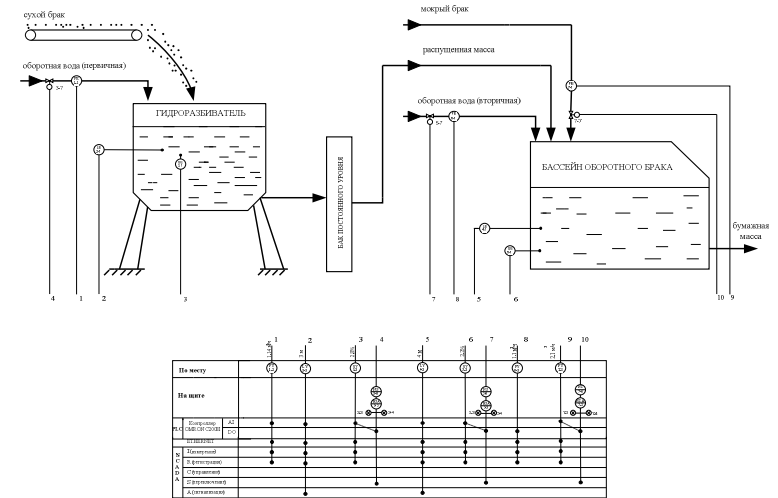


Рис. Пример функциональной схемы автоматизации развернутым способом

#### 1.4.1.2. Обозначение объектов управления

При построении функциональной схемы автоматизации целесообразно располагать технологическое оборудование и оборудование для перемещения материальных потоков (трубопроводы для потоков газообразных и жидких веществ, различные транспортеры для потоков сыпучих и твердых материалов) так, как это происходит традиционно при чтении: слева направо и сверху вниз.

Технологическое оборудование и оборудование для перемещения материальных потоков изображают упрощенно (контурно, без второстепенных конструктивных деталей, чтобы оно было «узнаваемо»), но с учетом взаимного расположения с приборами и средствами автоматизации. В отдельных случаях допускается изображение частей объекта в виде прямоугольников с наименованием этих частей. Возле изображения делаются поясняющие подписи (наименование оборудования или его позиционное обозначение) (рис. 2.3).

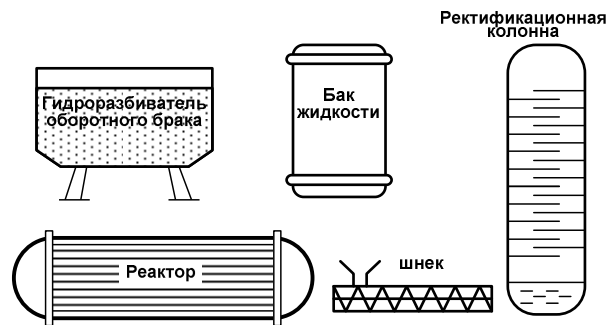


Рис. 2.3. Примеры отображения объектов управления (технологического оборудования и оборудования для перемещения материальных потоков) на функциональных схемах автоматизации

### 1.4.1.3. Обозначение коммуникационных (материальных) потоков и их регулирующих устройств

Для газообразных и жидких материальных потоков на трубопроводах и воздуховодах показывают только те регулирующие устройства (вентили, задвижки, заслонки, клапаны, запорные устройства и т. п.), которые участвуют в системе контроля и управления. На линиях трубопроводов стрелки, указывающие направление потока вещества, ставить желательно ставить слева направо, т. е. от входа к выходу, даже если на технологической схеме они имеют другое направление (кроме того, такие стрелки «приглашают» к чтению чертежа). Трубопроводы, идущие к конечным аппаратам и устройствам, в которых нет приборов и средств автоматизации, на схеме обрывают. На месте обрыва ставят стрелку и дают пояснение, например (к фильтру) или (от насоса) (рис. 2.4, а).

Для сыпучих и твердых материальных потоков показывают только те регулирующие устройства (различные транспортеры: ленточные, скребковые, ковшовые, шнеки и т. п.), которые участвуют в системе контроля и управления (рис. 2.4, б)

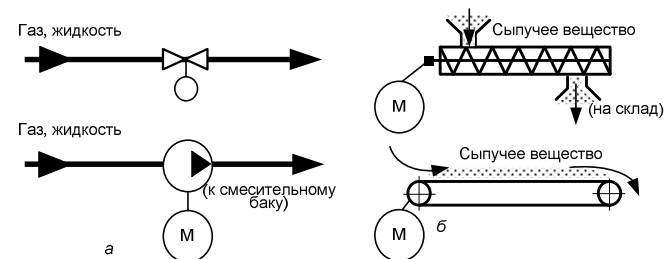


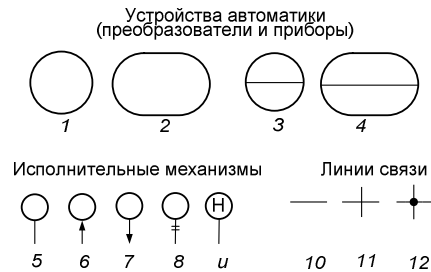
Рис. 2.4. Примеры отображения регулирующих устройств на материальных потоках: а – на трубопроводах для газообразных и жидких сред (вентиль и насос) б – для сыпучих веществ (шнек и ленточный транспортер)

### 1.4.1.4. Обозначение средств автоматизации: общие положения

На функциональных схемах в «слое» автоматизации показывают отборные устройства (которые можно назвать чувствительными элементами измерительных устройств), измерительные преобразователи, преобразующие и регулирующие приборы, вычислительные устройства, линии связи, переключатели, аппаратуру управления, исполнительные устройства, регулирующие механизмы (органы), элементы индикации и сигнализации, различные согласующие устройства и устройства обработки информации.

Простейшие вспомогательные устройства (такие, как реле, источники питания, выключатели и предохранители в цепях питания), соединительные коробки и другие устройства, а также монтажные элементы на функциональных схемах не показывают. Для сложных производственных процессов с большим объемом автоматизации функциональные схемы могут быть выполнены отдельно, например схемы автоматического управления, контроля, сигнализации.

На рис. 2.5 показаны обозначения приборов и исполнительных устройств на функциональных схемах автоматизации по ГОСТ 2.404-85. Отборное устройство не имеет специального обозначения, а представляет собой тонкую сплошную линию, соединяющую технологический трубопровод или аппарат с первичным измерительным преобразователем. При необходимости указания точного места расположения отборного устройства или точки измерения (внутри технологического аппарата) в конце тонкой линии изображается окружность диаметром 2 мм.



**Рис. 2.5.** Обозначение элементов функциональных схем автоматизации: 1 – устройство, устанавливаемое по месту (круг диаметром 10 мм), основное обозначение; 2 – устройство, устанавливаемое по месту, допускаемое обозначение; 3 – устройство, устанавливаемое на пульте, в щите (круг диаметром 10 мм), основное обозначение; 4 – устройство, устанавливаемое на пульте, в щите, допускаемое обозначение; 5 – исполнительный механизм, общее обозначение; 6 – исполнительный механизм, открывающий регулирующий орган (РО) при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала; 7 – исполнительный механизм, закрывающий РО при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала; 8 – исполнительный механизм, который при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала оставляет РО в неизменном положении; 9 – исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом; 10 – линия связи, общее обозначение; 11 – пересечение линии связи без соединения друг с другом; 12 – пересечение линии связи с соединением между собой

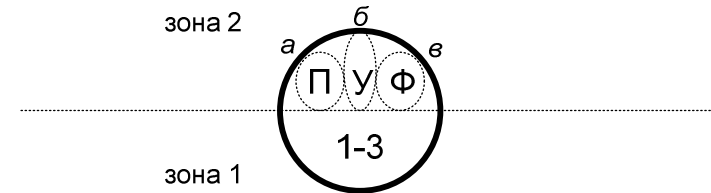
Главными на рис. 2.5 являются два устройства: устанавливаемое по месту и устанавливаемое на пульте, в щите. Следует помнить, что практически все первичные преобразователи (датчики) располагаются по месту, а вторичные преобразователи, устройства отображения и регулирования – в щитах и пультах. Их графическое отличие – присутствие линии диаметра, делящего круг пополам.

Эти устройства имеют форму круга (диаметром 10 мм), который условно можно разделить на две равные зоны (рис. 2.6):

– нижняя зона 1 – указывается позиция и позиционное обозначение устройства. Состоит из двух частей: цифрового обозначения, присваиваемого комплекту (функциональной группе приборов) и цифровых индексов, присваиваемых отдельным элементам, входящим в комплект. Существует альтернативный вариант нумерации отдельных элементов – буквенными индексами (строчными буквами русского алфавита). Например, 1-1 (альтернативный вариант 1а), что означает: первый комплект, первое устройство; 1-2 (альтернативный вариант 1б), что означает: первый комплект, второе устройство и т. д. Одина-

ковым комплектам или однотипным элементам одного комплекта присваивают одинаковые позиции независимо от места их установки;

– верхняя зона 2 – при помощи буквенных условных обозначений (по ГОСТ 2.404-85) указывается переменная (П) и функция (Ф) устройства.



**Рис. 2.6.** Зоны и поля заполнения устройств, устанавливаемых по месту и в щите или на пульте

Буквенные условные обозначения устройств располагают в следующем порядке слева направо (рис. 2.6, зона 2, поля а, б и в):

а) обозначение основной измеряемой величины (**Переменная**);

б) обозначение, уточняющее, если это необходимо (!), основную измеряемую величину (**Уточнение**);

в) обозначение функционального признака или признаков прибора (**Функция**).

*Обозначение основной измеряемой величины.* Измеряемые величины (технологические переменные) обозначают следующими буквами (основное обозначение букв): *D* – плотность; *E* – любая электрическая величина; *F* – расход; *G* – размер, положение, перемещение; *H* – ручное воздействие; *K* – время или временная программа; *L* – уровень; *M* – влажность; *P* – давление или вакуум; *Q* – величина, характеризующая качество (состав, концентрацию и т. п.); *R* – радиоактивность; *S* – скорость или частота; *T* – температура; *U* – несколько разнородных измеряемых величин; *V* – вязкость; *W* – масса; *X* – не рекомендуемая резервная буква.

*Обозначение, уточняющее, если это необходимо, основную измеряемую величину.* В этом случае используются следующие буквы: *D* – разность или перепад; *F* – соотношение (доля, дробь); *J* – автоматическое переключение или обегание; *Q* – интегрирование (суммирование по времени).

Кроме того, часть букв, имеющих дополнительное значение, используется для уточнения типа приборов: *E* – первичное преобразова-

ние (чувствительный элемент); *K* – станция управления; *T* – промежуточное преобразование (дистанционная передача); *Y* – преобразование, вычислительные функции.

Буква *E* (рис. 2.7) применяется для обозначения устройств, осуществляющих первичное преобразование сигналов (датчиков); *T* – для обозначения приборов с дистанционной передачей показаний. Например, бесшкальных, *K* – для обозначения приборов, имеющих станцию управления, т. е. переключатель для выбора вида управления (автоматическое – ручное) и устройство для дистанционного управления; *Y* – для построения обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств.

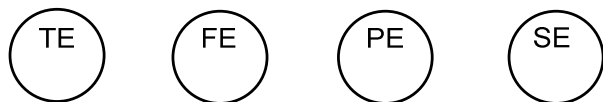
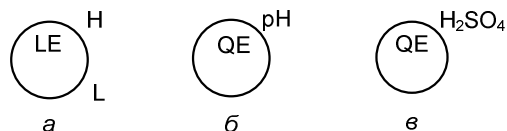


Рис. 2.7. Первичные преобразователи сигналов (датчики) наиболее часто встречающихся технологических параметров: температуры *T*, расхода *F*, давления *P*, скорости *S*

Обычно на первом месте ставится буква, обозначающая измеряемую величину, а на втором месте – одна из дополнительных букв: *E*, *T*, *K* или *Y*. Например, датчики расходомеров – *FE*; бесшкальные манометры с дистанционной передачей показаний – *PT*; бесшкальные расходомеры с дистанционной передачей – *FT* и т. д.

В качестве буквы, имеющей дополнительное значение, применяют: *H* – верхний предел измеряемой величины; *L* – нижний предел измеряемой величины. Буквы *H* и *L* наносят вне графического обозначения: справа от него.

Для конкретизации измеряемой величины (рис. 2.8) справа от изображения прибора необходимо указать наименование или символ измеряемой величины, например напряжение, сила тока, pH,  $O_2$  и т. п. Для обозначения дополнительных значений *D*, *F*, *Q* допускается применение строчных букв *d*, *f*, *q*.



77 Барашко О.Г. Автоматика, автоматизация и АСУ

Рис. 2.8. Конкретизация измеряемой технологической переменной – первичный преобразователь: *a* – значения верхнего (High) и нижнего (Low) состояния уровня, *б* – значения pH, *в* – концентрации  $H_2SO_4$

Обозначение функционального признака или признаков прибора. При обозначении функций, выполняемых прибором для отображения информации, используют буквы: *I* – показание; *R* – регистрация; *C* – регулирование или управление; *S* – включение (отключение или переключение); *A* – сигнализация. Если в одном приборе функциональных признаков несколько, то порядок расположения буквенных обозначений должен быть следующим: *IRCSA* (рис. 2.9).

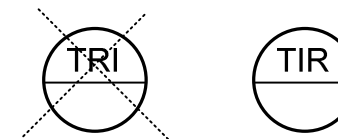


Рис. 2.9. Неправильная и правильная последовательность отображения функционального признака прибора

При построении условных обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств применяют надписи, расшифровывающие вид преобразования или операции, выполняемые вычислительными устройствами. Их наносят справа от графического обозначения приборов. Для обозначения рода энергии сигнала используются буквы: *E* – электрический; *P* – пневматический; *G* – гидравлический. Виды форм сигнала обозначает: *A* – аналоговый; *D* – дискретный. Операции, выполняемые вычислительными устройствами, обозначают:  $\Sigma$  – суммирование; *K* – умножение на постоянный коэффициент;  $\times$  – перемножение двух и более сигналов друг на друга;  $:$  – деление сигналов друг на друга;  $f^n$  – возведение величины сигнала *f* в степень *n*;  $\sqrt[n]{}$  – извлечение из величины сигнала корня степени *n*; *lg* – логарифмирование;  $dx/dt$  – дифференцирование;  $\int$  – интегрирование;  $\times(-1)$  – изменение знака сигнала; *max* – ограничение верхнего значения сигнала; *min* – ограничение нижнего значения сигнала; *B<sub>i</sub>* – передача сигнала на компьютер; *B<sub>o</sub>* – вывод информации с компьютера.

#### 1.4.1.4. Обозначение линий связи

Линии связи между приборами и средствами автоматизации на функциональной схеме изображаются однолинейно, тонкими сплошными линиями, независимо от фактического количества проложенных

проводов или труб. Подвод линии связи к символу прибора допускается изображать в любой точке окружности (сверху, снизу, сбоку) по кратчайшему расстоянию с минимальным числом изгибов и пересечений. Линии связи могут пересекать изображения технологического оборудования и коммуникаций. При необходимости указания направления передачи сигнала на линиях связи допускается наносить стрелки. При большом количестве линий связи допускается их разрыв (т. е. развернутый способ). Для удобства пользования схемой оба конца линии нумеруют одной и той же арабской цифрой. Нумерация разрывов линии связи со стороны щитовых приборов дается в порядке возрастания номеров. Допускается разрывать только часть линий связи. На участках линии связи непосредственно у прямоугольников, изображающих щиты или комплекты местных приборов, указывают предельные рабочие (максимальные и минимальные) значения контролируемых или регулируемых величин. Разрежение (вакуум) обозначается знаком (–). Для встраиваемых в технологическое оборудование приборов, не имеющих линий связи с другими приборами, предельные значения величин указывают возле обозначений приборов.

В случае функционального взаимодействия линий связи в месте их пересечения ставится точка.

Толщина линий должна быть следующей:

- 1) линии контуров агрегатов – 0,2–0,5 мм;
- 2) линии трубопроводов – 0,5–1,5 мм;
- 3) обозначение приборов и средств автоматизации – 0,5–0,6 мм;
- 4) линии связи – 0,2–0,3 мм;
- 5) линии прямоугольников, изображающих щиты и пульты – 0,5–1,0 мм;
- 6) линии выносок – 0,2–0,3 мм.

Размеры букв и цифр выбирают следующие:

- 1) для позиционных обозначений 3,5 мм;
- 2) для пояснительного текста и надписей – 3,5–5,0 мм.

При необходимости на схеме располагают таблицу не предусмотренных стандартами условных обозначений (условные обозначения трубопроводов, приборов и средств автоматизации, полное название принятых сокращений и различных заимствованных и резервных букв).

#### **1.4.1.5. Обозначение средств автоматизации: варианты применения**

Приборы и средства автоматизации, расположенные на щитах, пультах, показывают в прямоугольниках, изображающих щиты и

пульты (рис. 2.10).

Щит диспетчера	
----------------	--

**Рис. 2.10.** Изображение щитов и пультов на функциональных схемах автоматизации

Приборы и средства автоматизации, расположенные вне щитов и конструктивно не связанные непосредственно с технологическим оборудованием и коммуникациями, условно показывают в прямоугольнике «Приборы местные». Этот прямоугольник располагают над прямоугольником, изображающим щит (рис.2.10).

Приборы местные	
Щит оператора	

**Рис. 2.11.** Изображение приборов и средств автоматизации, расположенных вне щитов

Для однотипных технологических объектов, имеющих общие щиты, стивы с аппаратурой и приборами, на схеме рекомендуется технологическое оборудование показывать для одного объекта, а приборы и средства автоматизации, устанавливаемые на щите, показывать полностью для всех объектов.

Рассмотрим различные варианты. Приборы, применяемые для контроля (регулирования), однотипны, контролируемые параметры имеют одинаковые значения, при этом все повторяющиеся приборы показывают на щите один раз, а около их обозначения проставляют количество в штуках (рис. 2.12);



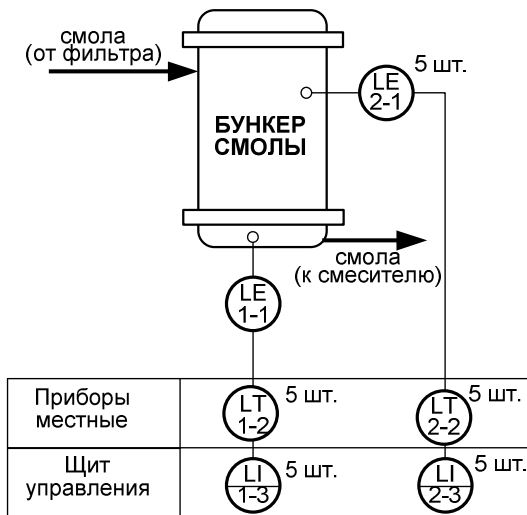


Рис. 2.12. Приборы и средства автоматизации однотипны и контролируемые параметры имеют одинаковые значения

Приборы однотипны, но контролируемые параметры имеют различные значения; при этом на щите следует показывать все приборы. Около линий связи, соединяющих приборы и средства автоматизации с управляемым объектом (без показанного технологического оборудования), дают пояснение, например «от реактора 2» (рис. 2.13);

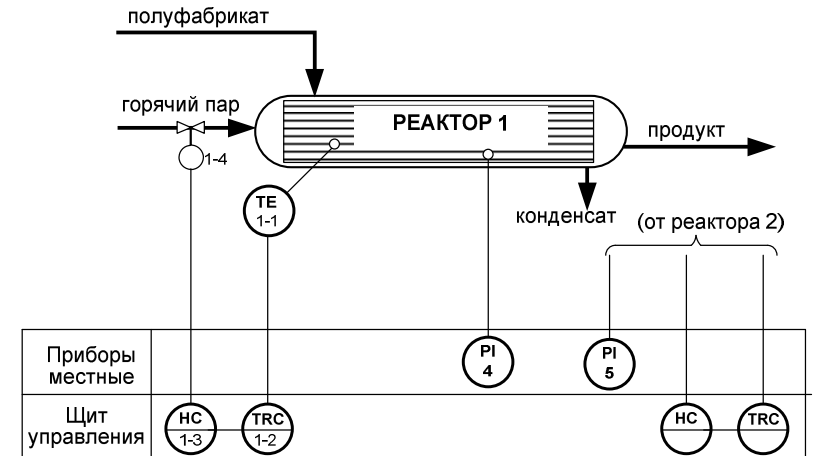


Рис. 2.13. Приборы и средства автоматизации однотипны, но контролируемые параметры имеют разные значения

При использовании многоточечного прибора для контроля какого-либо параметра в нескольких однотипных аппаратах на схеме показывают только один технологический аппарат и один датчик, а около прибора показывают линии связи от остальных датчиков (рис.2.14).

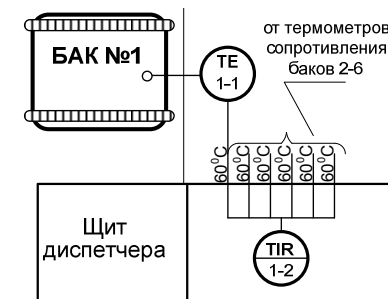


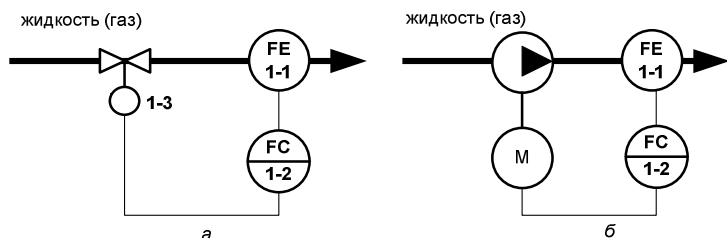
Рис. 2.14. Схема включения многоточечного прибора для однотипных технологических объектов

Приборы и средства автоматизации, встраиваемые в технологическое оборудование и коммуникации или механически связанные с ним, на схеме изображают в непосредственной близости к технологи-

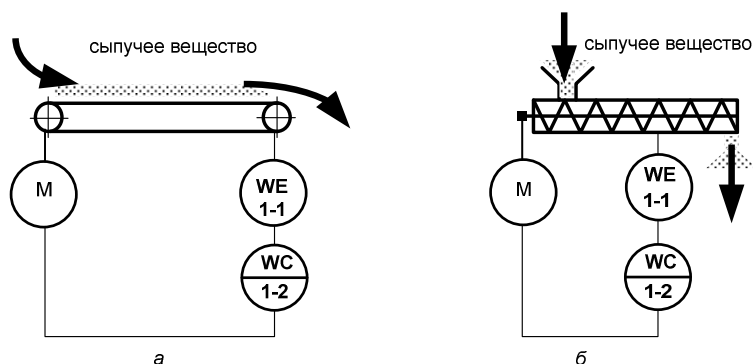
ческому оборудованию.

*Примеры оформления функциональных схем автоматизации.*

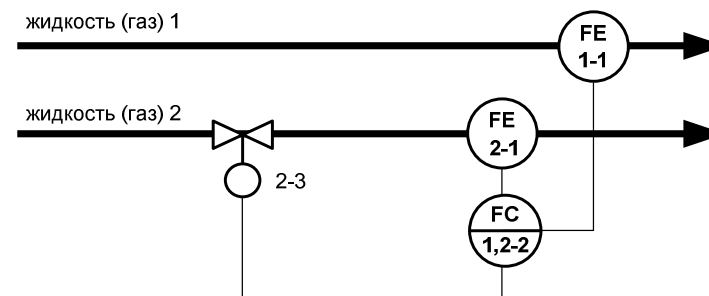
В примерах (2.15-2.17) рассмотрены возможные варианты построения функциональных схем автоматизации, выполненные упрощенным способом на основе традиционных регуляторов.



**Рис. 2.15.** Функциональные схемы САУ (регулирования, стабилизации) расхода жидкости (газа) при помощи изменения двух типовых схем: а – проходного сечения вентиля (G – т. е. изменением геометрии его проходного сечения); б – числа оборотов насоса (S – т. е. изменением его частоты)



**Рис. 2.16.** Функциональная схема САУ (регулирования, стабилизации) массы сыпучего материала при помощи изменения числа оборотов а – ленточного конвейера; б – шнека



**Рис. 2.17.** Функциональная схема САУ (регулирования, стабилизации) соотношения двух компонентов (жидкостей, газов) при помощи вентиля

#### 1.4.1.6. Обозначение промышленных контроллеров и рабочих станций SCADA-систем

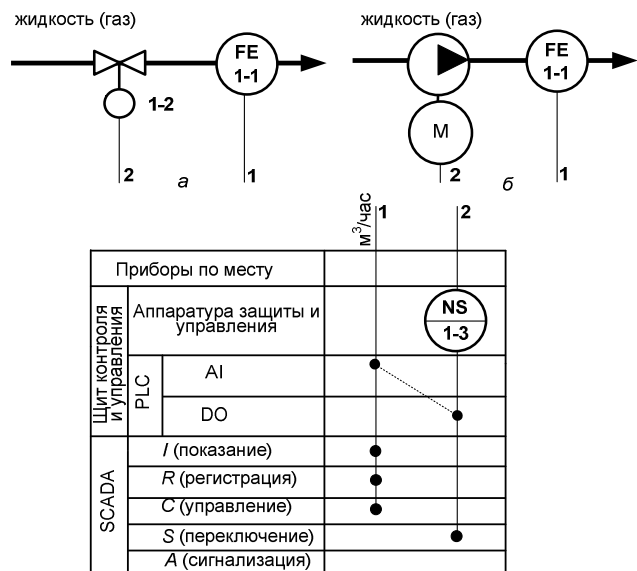
Промышленные контроллеры (PLC) и операторские станции SCADA-систем (системы диспетчерского управления) изображают с помощью прямоугольников. Их располагают в нижней части поля схемы в одном или нескольких горизонтальных рядах с указанием в каждом прямоугольнике соответствующего наименования.

При применении агрегатированных комплексов (промышленные контроллеры) и управляющих машин (рабочие станции SCADA-систем) допускается, кроме общего наименования, приводить наименование их отдельных блоков и функций. При этом прямоугольник, изображающий комплекс (машину), делят горизонтальными линиями на части, число которых соответствует количеству блоков (модулей) или функций.

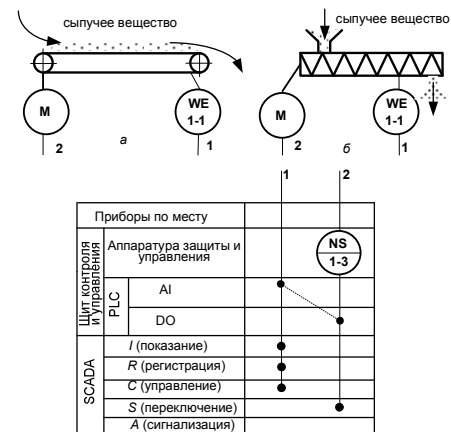
Для промышленного контроллера (в прямоугольнике указывается его тип, например, Siemens, Omron, GE Fanuc, Allen-Bradley и т. п.) таким делением является наличие аналоговых (Analog) и дискретных (Discrete) модулей ввода (Input) и вывода (Output). Таким образом, возможны следующие варианты модулей AI (аналоговый ввод), AO (аналоговый вывод), DI (дискретный ввод), DO (дискретный вывод) с уточнением конкретного типа модуля для соответствующего контроллера. Взаимосвязь между модулями ввода и вывода (т. е. реализацию обратной связи) показывают условной штрихпунктирной линией, точно так же, как и обратную связь на структурной схеме системы автоматического управления.

При обозначении функций, осуществляемых операторскими станциями SCADA-систем (указывается ее конкретная программная реализация, например, In Touch, iFix, Genesis, WinCC, Trace Mode и т. п.), целесообразно использовать те же буквы, что и при обозначении функциональных признаков приборов автоматизации (*I* – показание; *R* – регистрация; *C* – регулирование или управление; *S* – включение, отключение или переключение; *A* – сигнализация) и отмечать их наличие на мнемосхеме SCADA-системы соответствующим знаком (точкой).

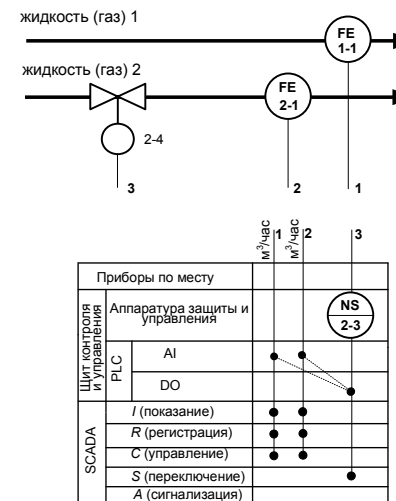
На рис. 2.18-2.20 показаны примеры схем автоматизации с применением промышленных контроллеров и рабочих станций SCADA-систем.



**Рис. 2.18.** Функциональные схемы САУ (регулирования, стабилизации) расхода жидкости (газа) при помощи изменения: а – проходного сечения вентиля; б – числа оборотов насоса (частотное) на основе промышленного контроллера и рабочей станции SCADA-системы



**Рис. 2.19.** Функциональные схемы САУ (регулирования, стабилизации) массы сыпучего материала при помощи изменения числа оборотов: а – ленточного конвейера; б – шнека на основе промышленного контроллера и рабочей станции SCADA-системы



**Рис. 2.20.** Функциональная схема САУ (регулирования, стабилизации) соотношения двух компонентов (жидкостей, газов) при помощи вентиля на основе промышленного контроллера и рабочей станции SCADA-системы

Данный способ представления функциональных схем автоматизации (развернутый способ) с применением промышленных контроллеров и рабочих станций SCADA-систем целесообразно использовать в случаях наличия большого количества контуров управления.

#### **1.4.2. Принципиальные электрические схемы автоматизации**

##### **1.4.2.1. Назначение и общие принципы построения**

Принципиальные электрические схемы контроля, управления и сигнализации служат:

- для изучения принципа действия системы;
- для определения полного состава приборов, аппаратов и устройств (а также связей между ними), действие которых обеспечивает решение задач управления, регулирования, защиты, измерения и сигнализации;
- основанием для разработки других документов проекта: монтажных таблиц щитов и пультов, схем внешних соединений и др.;
- для производства наладочных работ и эксплуатации.

При всем многообразии принципиальных электрических схем любая из них представляет собой определенным образом составленное сочетание отдельных, достаточно элементарных электрических цепей и типовых функциональных узлов, в заданной последовательности выполняющих ряд стандартных операций:

- передачу командных сигналов от органов управления или измерения к исполнительным органам;
- усиление, размножение и сравнение командных сигналов;
- превращение кратковременных сигналов в длительные и наоборот, блокировку сигналов и т. п.

К элементарным цепям могут быть отнесены типовые схемы включения измерительных приборов различного назначения.

В практике проектирования принципиальных электрических схем сложились некоторые общие принципы их построения. Помимо полного удовлетворения требований, предъявляемых к системе управления, каждая схема должна обеспечивать высокую надежность, простоту и экономичность, четкость действий при аварийных режимах, удобство оперативной работы, эксплуатации, четкость оформления.

1. *Надежность.* Под надежностью схемы понимают ее способность безотказно выполнять свои функции в течение определенного интервала времени в заданных режимах работы. Это требование

обычно обеспечивается целым рядом технических мероприятий, таких как применение наиболее надежных элементов, приборов и аппаратов; оптимальные режимы их работы; резервирование малонадежных или наиболее ответственных элементов или цепей схемы; автоматический контроль за неисправностью схемы; запретные блокировки, исключая возможность проведения ложных операций; сокращение времени нахождения элементов схемы под напряжением и т. д.

Надежность действия является главным требованием, которое предъявляется к схемам. Если при проектировании обеспечению надежности действия схемы не будет уделено должного внимания, то все другие преимущества, которые имеет схема, могут быть утрачены. Требования к уровню надежности схем регулирования, управления и сигнализации определяются оценкой последствий отказов их действия для конкретных участков технологического процесса.

2. *Простота и экономичность* проектируемых схем обеспечивается применением стандартной, наиболее дешевой аппаратуры и типовых (нормализованных) узлов; сокращением до минимума числа элементов в схеме и ограничением их номенклатуры; применением систем электропривода производственных механизмов, обеспечивающих высокие энергетические показатели в установившихся и переходных режимах работы, и т. п.

Существенное, а иногда и решающее значение при выборе схемы контроля и управления процессом на расстоянии имеет стоимость соединительных кабелей или проводов.

При проектировании принципиальной электрической схемы необходимо тщательный анализ предъявляемых к этой схеме требований. Если некоторые второстепенные требования значительно усложняют и удорожают схему, то эти требования следует пересмотреть. Решая вопросы экономичности схемы, необходимо учитывать не только капитальные вложения, но и ежегодные эксплуатационные расходы.

3. *Четкость действия схемы при аварийных режимах.* Каждая принципиальная электрическая схема в системах автоматизации технологических процессов должна быть построена таким образом, чтобы при возникновении аварийных режимов, вызванных неисправностями в цепях управления, а также при полном исчезновении или снижении и последующем восстановлении напряжения питания в главных (силовых) цепях управления обеспечивалась безопасность обслуживающего персонала и предотвращалось дальнейшее развитие аварии, приводящее к повреждению механического или электрического оборудования и браку продукции.

При анализе работы схемы в аварийных режимах следует учитывать возможность перегорания предохранителей или отключения автоматов; появление короткого замыкания или замыкания на землю в различных точках схемы (в основном во внешних соединениях); обрыв проводов; сгорание катушек контакторов или реле; приваривания контактов и т. п. Принято рассматривать аварийный режим, возникающий в результате появления какой-либо одной неисправности, т. к. вероятность появления одновременно двух или более неисправностей в одной и той же схеме достаточно мала.

4. *Удобство оперативной работы.* Принципиальная электрическая схема должна обеспечивать оптимальные условия для работы оперативного персонала. Это требование предусматривает упрощение операций, производимых обслуживающим персоналом при управлении; сокращение числа органов управления; возможность простого и быстрого выбора необходимого режима работы; переход с автоматического управления на ручное и обратно; снятие и введение блокировочных связей и зависимостей и т. д.

5. *Удобство эксплуатации.* Принципиальная электрическая схема должна быть спроектирована так, чтобы ее эксплуатация в производственных условиях была предельно простой, требовала минимум затрат и внимания эксплуатационного персонала, обеспечивала возможность проведения ремонтных и наладочных работ с соблюдением необходимых мер безопасности.

6. *Четкость оформления.* Оформление любой электрической схемы следует выполнять ясно, просто и компактно. Графическое оформление схемы должно способствовать наилучшему восприятию содержания схемы.

Порядок разработки принципиальных электрических схем:

1) на основании функциональной схемы автоматизации составляют четко сформулированные технические требования, предъявляемые к принципиальной электрической схеме;

2) применительно к этим требованиям устанавливают условия и последовательность действия схемы;

3) каждое из заданных условий действия схемы изображают в виде тех или иных элементарных цепей, отвечающих данному условию действия;

4) элементарные цепи объединяют в общую схему;

5) производят выбор аппаратуры и электрический расчет параметров отдельных элементов (сопротивлений обмоток реле, нагрузки контактов и т. п.);

6) корректируют схему в соответствии с возможностями принятой аппаратуры;

7) проверяют в схеме возможность возникновения ложных или обходных цепей или ее неправильной работы при повреждениях элементарных цепей или контактов;

8) рассматривают возможные варианты решения и принимают окончательную схему применительно к имеющейся аппаратуре.

В настоящее время большое внимание уделяется внедрению в практику проектирования автоматизированных способов выполнения схем, в том числе и принципиальных электрических, что призвано значительно улучшить качество документации и сократить сроки проектирования.

#### **1.4.2.2. Основные требования к содержанию и оформлению схем**

Принципиальные электрические схемы управления, регулирования, измерения, сигнализации, питания, входящие в состав проектов автоматизации, выполняют в соответствии с требованиями ГОСТов по правилам выполнения схем, условным графическим обозначениям, маркировке цепей и буквенно-цифровым обозначениям элементов схем.

*Исключение:* основная надпись чертежа, которую оформляют так же, как и основные надписи других чертежей, входящих в состав проекта; обозначение (шифр) схемы имеет порядковый номер по описи материалов проекта.

– ГОСТ 2.701-84, ГОСТ 2.702-75 и ГОСТ 2.708-81 определяют общие требования и правила выполнения схем;

– ГОСТ 2.709-72 устанавливает требования к обозначению цепей;

– ГОСТ 2.710-81 устанавливает требования к буквенно-цифровым обозначениям элементов схем.

Все остальные стандарты устанавливают условные графические обозначения элементов схем.

ГОСТ 2.701-84 помимо классификации схем, общих требований к их выполнению содержит также определение основных понятий, используемых в стандартах. Эти понятия следующие:

*элемент схемы* – составная часть схемы, которая выполняет определенную функцию в изделии и не может быть разделена на части, имеющие самостоятельное функциональное назначение (резистор, трансформатор и т. п.);

*устройство* – совокупность элементов, представляющая собой единую конструкцию (блок, плата и т. п.); устройство может не иметь

в изделии определенного функционального обозначения;

*функциональная группа* – совокупность элементов, выполняющих в изделии определенную функцию и не объединенных в единую конструкцию;

*функциональная часть* – элемент, устройство, функциональная группа;

*функциональная цепь* – линия, канал, тракт определенного назначения;

*линия взаимосвязи* – отрезок линии, указывающий на наличие связи между функциональными частями изделий;

*установка* – условное наименование объекта в энергетических сооружениях, на который выпускается схема, например главные цепи и др.

На чертежах принципиальных электрических схем системы автоматизации в общем случае должны изображаться:

– цепи управления, регулирования, измерения, сигнализации, электропитания, силовые цепи;

– контакты аппаратов данной схемы, занятые в других схемах, и контакты аппаратов других схем;

– диаграммы и таблицы включений контактов переключателей, программных устройств, конечных и путевых выключателей, циклограммы работы аппаратуры;

– таблицы применяемости;

– поясняющая технологическая схема, схема блокировочных зависимостей работы оборудования; циклограмма работы оборудования;

– необходимые пояснения и примечания;

– перечень элементов;

– основная запись.

В зависимости от сложности проектируемого объекта различные цепи могут изображаться совмещенно на одном чертеже или нескольких либо для каждой из цепей разрабатываются отдельные схемы, например принципиальные электрические схемы управления, сигнализации и т. п.

Схемы выполняются без соблюдения масштаба; действительное пространственное расположение составных частей системы автоматизации, как правило, не учитывается или при необходимости учитывается приближенно. Графическое обозначение элементов и соединяющие их линии связи необходимо стремиться располагать на схеме таким образом, чтобы обеспечить наилучшее представление о взаимо-

действии ее составных частей. Линии связи должны состоять из горизонтальных и вертикальных отрезков и иметь наименьшее число изломов и взаимных пересечений. Расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3 мм.

Линии связи показываются, как правило, полностью. Однако в случае, когда это затрудняет чтение схем, допускается обрывать линии связи. Место обрыва линии связи заканчивается стрелкой, около которой указывают, куда эта линия подключается и (или) необходимые характеристики цепей, например обозначение цепи, полярность и т. д.

Если в состав принципиальной схемы входит какое-либо устройство, имеющее самостоятельную принципиальную схему, то оно выделяется (очерчивается) сплошной линией, равной по толщине линии связи.

Элементы и устройства на принципиальных электрических схемах могут выполняться совмещенным или разнесенным способом. При совмещенном способе составные части элементов, например катушки, контакты и т. п., изображают на схеме в непосредственной близости друг к другу (как в собранном виде). Этот способ находит применение при изображении, например, регулирующих устройств, устройств промышленного телевидения и др.

При разнесенном способе составные части элементов и устройств или отдельные элементы устройств изображают на схеме в разных местах таким образом, чтобы отдельные цепи были изображены наиболее наглядно. В этом случае схема состоит из ряда цепей, расположенных слева направо или сверху вниз, как правило, в порядке последовательности действия отдельных элементов схемы (строчный способ). Предпочтительно отдельные цепи располагать в горизонтальную строчку, чтобы они читались слева направо, а вся схема в целом – сверху вниз аналогично чтению текстового материала.

## Краткое содержание раздела

### КЛЮЧЕВЫЕ ТЕРМИНЫ

Управление

Объект управления (ОУ)

входная переменная

управляющая переменная

возмущающая переменная

выходная переменная

Обратная связь (ОС)

отрицательная обратная связь

положительная обратная связь

сигнал отклонения (рассогласования)

Система автоматического управления (САУ)

датчик (Д)

задающее устройство (ЗУ)

сравнивающее устройство (Ср)

алгоритм регулирования

промышленный контроллер (PLC)

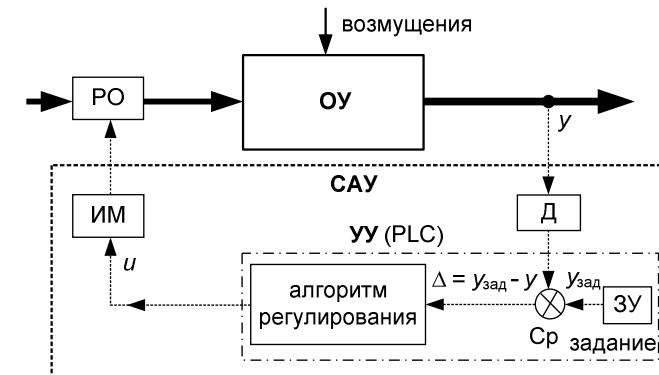
исполнительный механизм (ИМ)

регулирующий орган (механизм) (РО)

Система управления (СУ)

Производственные системы, состоящие из производственных процессов (*объектов управления* – ОУ) не всегда могут устранить возникающие отклонения, вызванные *возмущениями*, и препятствующие нормальному ходу протекания процесса, поэтому их снабжают *системами автоматического управления (САУ)*, позволяющих целенаправленно воздействовать на ОУ. Взаимодействие между ОУ и САУ осуществляется с помощью *обратной связи (ОС)*.

Типовая структура одноконтурной локальной САУ имеет вид:



## 2. СРЕДСТВА И УСТРОЙСТВА ОБМЕНА, ВВОДА, ОБРАБОТКИ И ВЫВОДА ИНФОРМАЦИИ В САУ

### 2.1. Средства и устройства обмена

#### 2.1.1. Локальные промышленные сети (ЛПС)

Информационный обмен между различными уровнями АСУ осуществляется посредством *локальных вычислительных сетей*. Сети охватывают относительно небольшие территории (до 5-10 км) внутри отдельных предприятий и объединяют с помощью общего канала связи сотни абонентских узлов (компьютеры, PLC, операторские панели визуализации, серверы и т. д.). Такие сети могут подключаться к другим локальным сетям, а также региональным и глобальным сетям.

Локальные вычислительные сети, обеспечивающие физическую и логическую связь между промышленными контроллерами, измерительными преобразователями (датчиками) и исполнительными механизмами и их интеграцию в единую систему управления технологическим процессом, называются *локальными промышленными сетями* (ЛПС) (Fieldbus – «полевая» шина).

Основными требованиями к сетям, эксплуатирующимся в промышленных условиях, являются:

- высокая надежность;
- высокая скорость передачи данных (что отличает их, например, от глобальных сетей, которые могут вносить в передачу данных значительные задержки);
- простота монтажа и эксплуатации.

В настоящее время существует большое разнообразие локальных промышленных сетей, которые условно разделены на два класса:

1. промышленные сети нижнего уровня – полевые шины (Field Buses) (см. 2.1.5);

2. промышленные сети верхнего (операторского) уровня (Terminal Buses) (см. 2.1.6).

Основой работы ЛПС служит стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (International Organization of Standardization – ISO), описывающий правила соединения аппаратных и программных средств в единую систему. Он носит название модели *взаимодействия открытых систем* – (Open System Interconnection – OSI). Как правило, производители сетевого оборудования определяют свои изделия в терминах OSI-модели.



### 2.1.2. Эталонная модель взаимодействия открытых систем (OSI-модель)

Архитектура OSI-модели разбита на семь независимых уровней. В соответствии с этим передача информации в сети сводится к семи подзадачам, соответствующим определенным уровням модели. OSI-модель определяет назначение и правила взаимодействия уровней. Отдельные уровни отличаются по специфике выполняемых процессов и по технологиям реализации. Каждый уровень обеспечивает полный набор услуг для уровня, расположенного выше.

В табл. 2.1 указаны конкретные примеры реализации всех семи уровней OSI-модели. Нижние два уровня – физический и канальный – реализуются аппаратно-программным способом, остальные пять – в основном программным. Так, сетевой уровень реализуется драйверами операционной системы, а также аппаратными и программными средствами маршрутизаторов. Верхние четыре уровня реализуются средствами сетевой операционной системы.

При передаче информации между прикладными программами, находящимися на разных узлах сети, передаваемая информация проходит вниз через все уровни системы и преобразуется к виду, пригодному для передачи по физическим каналам связи. После доставки по требуемому адресу информация проходит через все уровни вверх и преобразуется в исходный вид.

Таблица 2.1. Примеры реализации уровней OSI-модели

Уровень	Название	Назначение
1	Физический	Физическое (механическое и электрическое) соединение среды передачи данных
2	Канальный	Передача по физическому адресу в сети, доступ к среде передачи данных
3	Сетевой	Логическая адресация и маршрутизация
4	Транспортный	Прозрачная передача пакетов данных по сети
5	Сеансовый	Управление диалогом между устройствами сети
6	Представительный	Преобразование данных при передаче информации между устройствами с различными форматами данных
7	Прикладной	Предоставление сетевого сервиса для программ пользователя

Локальные промышленные сети, как правило, реализуют физический, канальный и прикладной уровни OSI-модели, остальные уровни в большинстве случаев избыточны.

### 2.1.3. Топология (архитектура) ЛПС

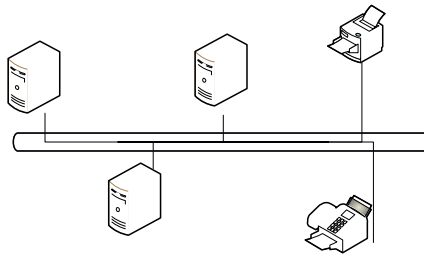
Топология сети описывает способ объединения различных сетевых устройств. Выбор топологии влияет на характеристики сети: способ доступа к сети, возможность ее расширения, надежность. Основными топологиями являются:

- шина (Bus);
- кольцо (Ring);
- звезда (Star).

При построении сетей используются два варианта подключения сетевых устройств: радиальное и магистральное:

- *радиальное соединение* между двумя сетевыми устройствами (компьютером, PLC и т. п.) называется соединением *точка к точке* (point to point interface);
- *магистральное соединение* сетевых устройств, при котором сетевые устройства независимо выходят на общую линию передачи, называется «*многоточечным*» соединением (multipoint).

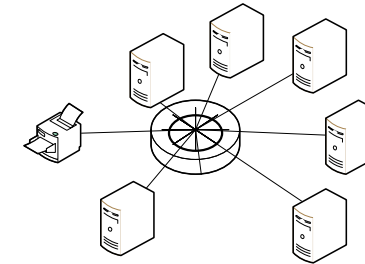
**Топология «Шина» (магистраль).** Наиболее простые и распространенные сети. Для объединения группы устройств в сеть здесь применяется единый (магистральный) кабель, имеющий несколько промежуточных ответвлений, которые используются для соединения магистрального провода с сетевыми устройствами. Тип соединения – *многоточечный*. Каждое сетевое устройство может передавать данные только в том случае, если другие «молчат».



Сеть с такой топологией отличается легкостью расширения, однако чем больше абонентских узлов в сети, тем ниже ее производительность. Выход из строя магистрального кабеля влечет за собой остановку всей сети, однако выход из строя одного узла не нарушает работоспособности сети.

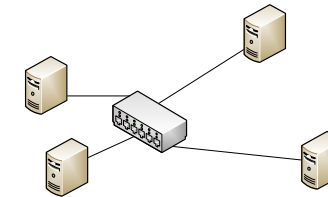
**Топология «Кольцо».** Информация передается от узла к узлу по-

следовательно по физическому кольцу. Каждый узел передает информацию только одному из узлов. Тип соединения – *точка к точке*. Приемный узел выступает в роли повторителя, регенерируя полученную информацию.



К передатчикам и приемникам здесь предъявляются более низкие требования, чем в широкоэмитательных конфигурациях, где передаваемые данные получают все узлы сети. На различных участках сети могут использоваться разные виды физической передающей среды. Выход из строя линии связи приводит к отказу сети.

**Топология «Звезда».** Все сетевые узлы подключены собственным физическим каналом связи к центральному концентратору (или контроллеру). Тип соединения – *точка к точке*. Информация от периферийного передающего узла поступает к другим периферийным узлам через центральный узел.

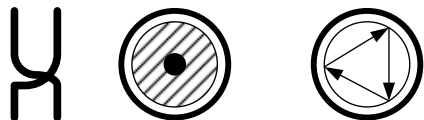


Центральный узел должен отличаться повышенной надежностью, поскольку выход его из строя останавливает всю сеть. Выход из строя периферийного узла или одного физического канала связи отключает только один сетевой узел и не влияет на работоспособность остальной сети.

## 2.1.4. Аппаратные компоненты ЛПС

### 2.1.4.1. Канал передачи данных

Передача данных в локальной промышленной сети происходит по каналу связи. В качестве физической среды передачи данных обычно применяется витая пара, коаксиальный кабель или оптоволокно, реже – канал беспроводной связи.



- *витая пара* представляет собой пару изолированных проводящих жил, скрученных друг с другом и помещенных в общую диэлектрическую оболочку. Достоинство – низкая стоимость и простота применения.
- *коаксиальный кабель* представляет собой медную токоведущую жилу, окруженную слоем диэлектрика и покрытием в виде металлической оплетки или фольги. Существует в двух вариантах: тонкий – 6 мм (10 Base2 /IEEE 802.3) и толстый – 12 мм (10 Base5/IEEE802.3). Достоинство – возможность прямых ответвлений (путем прокалывания изоляционного слоя), благодаря чему сеть может легко наращиваться, а также помехозащищенность.
- *оптоволоконный кабель* состоит из оптоволокон и защитного покрытия. Оптоволокно изготавливается из стекла или специального пластика и служит для передачи световых сигналов. Оптоволокно покрывается светоотражающим составом, предотвращающим рассеивание света. Снаружи оптоволокно покрыто поливинилхлоридом или каким-либо другим защитным покрытием, повышающим прочность кабеля. Используется в основном оптоволокно двух типов. Первый тип предполагает параллельную передачу нескольких световых сигналов и применяется для передач на расстояние до 2000 м, источник сигнала – диод. Второй тип предусматривает одиночный режим передачи, применяется для передачи сигнала на расстояние до 5000 м, источник сигнала – лазер. Достоинства – высокая скорость передачи данных и устойчивость к электромагнитным помехам, так как оптоволокно не является электропроводящим материалом.

Основные характеристики рассмотренных сред передачи данных

сведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Основные характеристики сред передачи данных

Тип среды передачи	Скорость передачи, Мбит/с	Длина сетевого сегмента, м	Примерная стоимость 1 м, долл.
Витая пара	До 100	100 м	0,3-0,7
Тонкий коаксиальный кабель	До 10	185 м	2
Толстый коаксиальный кабель	До 100	500 м	2,5
Оптоволокно	100 и выше	2-5 км	2-6

### ПЕРЕХОД

**Физические интерфейсы.** Определяются рядом стандартов, устанавливающих требования:

- к характеристикам электрических сигналов (фронты и уровни напряжения или тока),
- способам кодирования данных, типам разъемов и т.д.

*Стандарт RS-232C.* Применяется при относительно медленной передаче сигналов – скорость передачи данных от 50 до 38 400 бит/с; максимальная длина соединения (без повторителей) – 15 м. Информация передается последовательно бит за битом асинхронным способом. Передаваемый байт данных содержит бит паритета и сопровождается стартовым и стоповыми битами. Единица и ноль кодируются импульсами напряжения положительной и отрицательной полярности.

Стандарт определяет также распайку интерфейсного разъема. Интерфейс RS-232C с передачей по току (current loop – токовая петля) представляет собой двухпроводную линию, образующую токовую петлю. Передающее устройство является дискретно переключаемым источником тока. Данные передаются сигналами постоянного тока 4-20 мА. Токовая петля позволяет увеличить помехозащищенность и передавать сигналы по линии длиной до 3 км.

*Стандарты RS-422 и RS-485.* Разработанные позднее стандарты интерфейсов последовательной передачи данных RS-422 и RS-485 допускают значительно большие скорости и дальность передачи данных (табл. 3.3). Наибольшее распространение нашел стандарт RS-485. Интерфейсы на базе этого стандарта реализованы практически во всех промышленных компьютерах.

Таблица 3.3 Характеристики стандартных физических интерфейсов

Стандарт	Вид подключения	Вид передачи	Число приемников на один передатчик в линии (макс)	Скорость передачи	Длина линии без повторителей (макс), м
RS-232C	Точка к точке	Несимметричная линия, передача по напряжению, дуплекс.	1/1	19,2 Кбит/с	15
		Передача по току, дуплекс	1/1	9,6 Кбит/с 1,2 Кбит/с	300 2000

RS-422	Точка к точке	Симметричные (дифференциальные) линии, передача по напряжению, дуплекс	1/10	10 Мбит/с 100 Кбит/с	13 1 300
RS-485	Много-точка	Симметричные линии, передача по напряжению, полудуплекс	1/32	10 Мбит/с 1 Мбит/с 100 Кбит/с	13 50 1300

**Логическая организация интерфейса.** Информация по ЛПС передается блоками, которые называются пакетами или сообщениями. Типовая структура пакета имеет вид, показанный на рис. 3.3.

Адрес	Управление	Данные	Контроль ошибок
-------	------------	--------	-----------------

Рис. 3.3. Типовая структура пакета

Поля пакета имеют следующее назначение: адрес абонента сети; управляющая информация о последовательности действий (например, запись, чтение данных и др.); передаваемые данные; контрольный код обнаружения ошибок.

**Методы доступа к среде передачи данных.** Используются в основном два метода упорядоченного доступа к общей для нескольких взаимодействующих сетевых устройств среде передачи данных (шинной магистрали) – централизованный и децентрализованный.

*Централизованный метод доступа* (метод «ведущий/ведомый» – master/slave) предполагает наделение одного из узлов правами ведущего, или хозяина (master). Другие узлы являются ведомыми (slave). Ведущий узел определяет порядок и время доступа ведомых узлов к шине, инициирует циклы обмена данными по шине с ведомыми узлами. Сообщения могут передаваться только одному узлу или всем узлам одновременно. В последнем случае это широкоэвещательный (broadcast) режим, не требующий адресации каждого абонента сети. При отказе ведущего узла обмен по шине приостанавливается. Централизованный метод используется, как правило, на нижнем уровне управления – уровне контроллеров, датчиков, исполнительных механизмов.

*Децентрализованный метод доступа* к шине предполагает наделение правами ведущего группы устройств сети. Этот метод получил наибольшее развитие. Функции ведущего в этом случае могут передаваться от одного узла к другому.

#### 2.1.4.2. Сетевые устройства ЛПС

Основными специализированными сетевыми устройствами, используемыми в локальных сетях, являются:

- трансивер (transceiver) – приемопередатчик, который служит для подключения сетевого узла к основной магистрали сети из коаксиального кабеля или оптоволокна;
- концентратор (hub) – используется при создании инфраструктуры сети. Соединяет сегменты кабеля, восстанавливает и усиливает передаваемый сигнал;
- интеллектуальный концентратор (switcher) – обладает возможностью коммутировать входящие пакеты, т.е. ретранслировать их по сегментам, выделенным на основе анализа адресной информации. Трансивер и концентратор реализуют функции физического уровня OSI-модели;
- мост (bridge) – интеллектуальное устройство, которое служит для соединения двух различных сетей, например Profibus и Ethernet. Передает пакеты из одной сети в другую по адресу назначения и реализует функции канального уровня OSI-модели.
- маршрутизатор (router) – используется в сложных сетях в точках разветвления маршрутов для определения дальнейшего наилучшего пути пакета, функционирует на сетевом уровне OSI-модели. В качестве маршрутизатора может использоваться сетевая станция, имеющая несколько сетевых интерфейсов и соответствующее программное обеспечение.

*Сетевой адаптер.* Каждый из узлов сети содержит сетевой адаптер (плату или микросхему интерфейсного контроллера) реализующий функции физического и канального уровней OSI-модели и предназначенный для сопряжения сети со средой передачи данных. В его функции входят:

- контроль возможности доступа к сети;
- идентификация адреса;
- кодирование и декодирование сигнала;
- преобразование параллельного кода в последовательный и обратное преобразование соответственно при передаче и приеме;
- промежуточное хранение данных в буферной памяти;
- контроль ошибок.

### 2.1.5. Промышленные сети нижнего уровня (полевые шины)

Главной функцией полевой шины является обеспечение сетевого взаимодействия между промышленными контроллерами и удаленной периферией (например, узлами ввода/вывода). Помимо этого, к полевой шине могут подключаться различные контрольно-измерительные приборы (Field Devices), снабженные соответствующими сетевыми интерфейсами. Такие устройства часто называют интеллектуальными (Intelligent Field Devices), так как они поддерживают высокоуровневые протоколы сетевого обмена.

Пример полевой шины представлен на рис. 1.

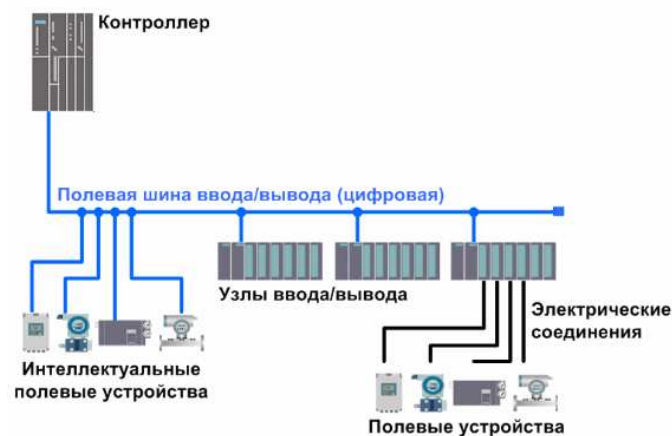


Рис. 1. Полевая шина.

Существует множество стандартов полевых шин, наиболее распространенные из которых получили:

1. Profibus DP
2. Profibus PA
3. Foundation Fieldbus
4. Modbus RTU
5. HART
6. DeviceNet

Несмотря на нюансы реализации каждого из стандартов (скорость передачи данных, формат кадра, физическая среда), у них есть одна общая черта – используемый алгоритм сетевого обмена данными, ос-

нованный на классическом принципе Master-Slave или его небольших модификациях.

Полевые шины удовлетворяют строгим техническим требованиям, благодаря чему становится возможной их эксплуатация в тяжелых промышленных условиях. К этим требованиям относятся:

1. Детерминированность, т.е. передача сообщения из одного узла сети в другой занимает строго фиксированный отрезок времени (офисные сети, построенные по технологии Ethernet являются недетерминированными сетями, т.е. не определяет время, за которое кадр из одного узла сети будет передан другому, и, строго говоря, нет никаких гарантий, что кадр вообще дойдет до адресата). Для промышленных сетей это недопустимо.

2. Поддержка больших расстояний, т.к. расстояние между объектами управления может порой достигать нескольких километров. Применяемый протокол должен быть ориентирован на использование в сетях большой протяженности.

3. Защита от электромагнитных наводок. Длинные линии подвержены пагубному влиянию электромагнитных помех, излучаемых различными электрическими агрегатами. Сильные помехи в линии могут исказить передаваемые данные до неузнаваемости. Для защиты от таких помех применяют специальные экранированные кабели, а также оптоволоконно, которое, в силу световой природы информационного сигнала, вообще нечувствительно к электромагнитным наводкам. Кроме этого, в промышленных сетях используются специальные методы цифрового кодирования данных, препятствующие их искажению в процессе передачи.

4. Упрочненная механическая конструкция кабелей и соединителей. Учитывая в каких условиях приходится прокладывать коммуникационные линии, кабели и соединители должны быть прочными, долговечными и приспособленными для использования в самых тяжелых окружающих условиях (в том числе агрессивных атмосферах).

По типу физической среды полевые шины делятся на два типа:

1. Полевые шины, построенные на базе оптоволоконного кабеля. Преимущества использования оптоволоконной линии: возможность построения протяженных коммуникационных линий (протяженностью до 10 км и более); большая полоса пропускания; иммунитет к электромагнитным помехам; возможность прокладки во взрывоопасных зонах. Недостатки: относительно высокая стоимость кабеля; сложность физического подключения и соединения кабелей. Эти работы должны выполняться квалифицированными специалистами.

2. Полевые шины, построенные на базе медного кабеля. Как правило, это двухпроводной кабель типа «витая пара» со специальной изоляцией и экранированием. Преимущества: сравнительно невысокая цена; легкость прокладки и выполнения физических соединений. Недостатки: подвержен влиянию электромагнитных наводок; ограниченная протяженность кабельных линий; меньшая по сравнению с оптоволоконном полоса пропускания.

*Методы обеспечения отказоустойчивости промышленных сетей на полевом уровне*

При эксплуатации САУ аспект отказоустойчивости сети становится ключевым.

На рис. 2 изображена базовая архитектура полевой шины – одиночная (нерезервированная). Шина связывает контроллер и четыре узла ввода/вывода IO1-IO4. Очевидно, что такая архитектура наименее отказоустойчива, так как обрыв шины, в зависимости от его локализации, ведет к потере коммуникации с одним, несколькими или всеми узлами шины. В нашем случае в результате обрыва теряется связь с двумя узлами.

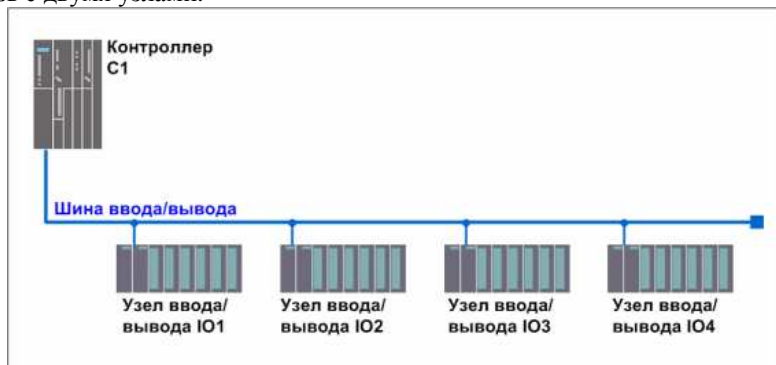


Рис. 2. Нерезервированная шина

На рис. 3 показана конфигурация в виде дублированной полевой шины, связывающей резервированный контроллер с узлами ввода/вывода. Каждый узел ввода/вывода снабжен двумя интерфейсными модулями. Если не считать сами модули ввода/вывода, которые резервируются редко, в данной конфигурации единичной точки отказа нет.

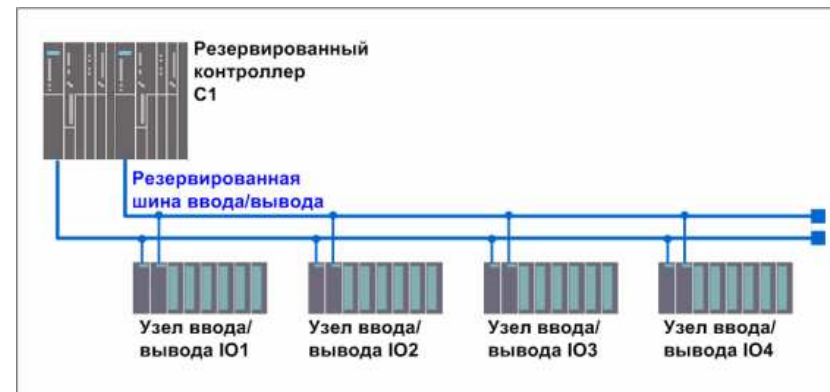


Рис. 3. Резервированная шина

Конфигурация в виде дублированной полевой шины является наиболее распространенным техническим решением.

На рис. 4 показана конфигурация в виде оптоволоконного кольца. Контроллер и узлы ввода/вывода подключены к кольцу с помощью резервированных медных сегментов. Для состыковки медных сегментов сети с оптоволоконными применяются специальные конверторы среды передачи данных «медь»-«оптоволоконно» (OLM, Optical Link Module). Для каждого из стандартных протоколов можно выбрать соответствующий OLM.

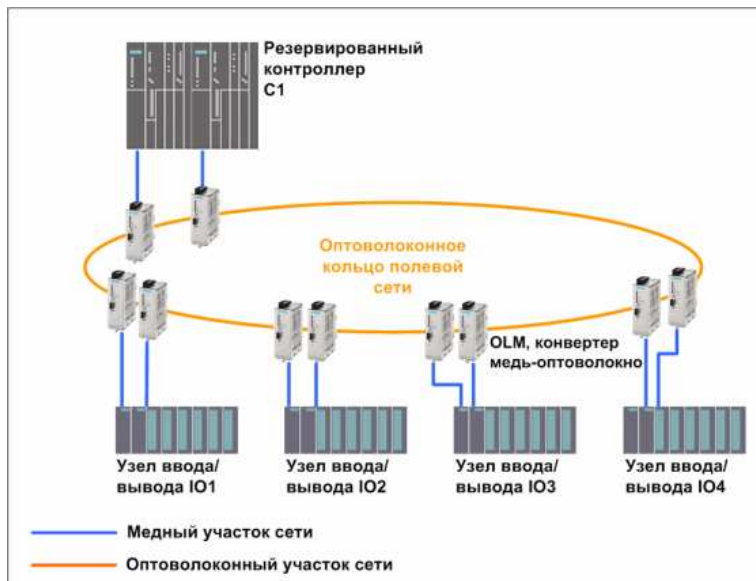


Рис. 4. Одинарное оптоволоконное кольцо

Как и дублированная шина, оптоволоконное кольцо устойчиво к возникновению одного обрыва в любом его месте. Система такой обрыв вообще не заметит, и переключение на резервные интерфейсные и коммуникационные модули не произойдет. Более того, обрыв одного из двух медных сегментов, соединяющих узел с оптоволоконным кольцом, не приведет к потере связи с этим узлом. Однако второй обрыв кольца может привести к неработоспособности системы. В общем случае два обрыва кольца в диаметрально противоположных точках ведут к потере коммуникации с половиной подключенных узлов.

На рис. 5 изображена конфигурация с двойным оптическим кольцом. В случае если в результате образования двух точек обрыва первичное кольцо выходит из строя, система переключается на вторичное кольцо. Очевидно, что такая архитектура сети является наиболее отказоустойчивой.

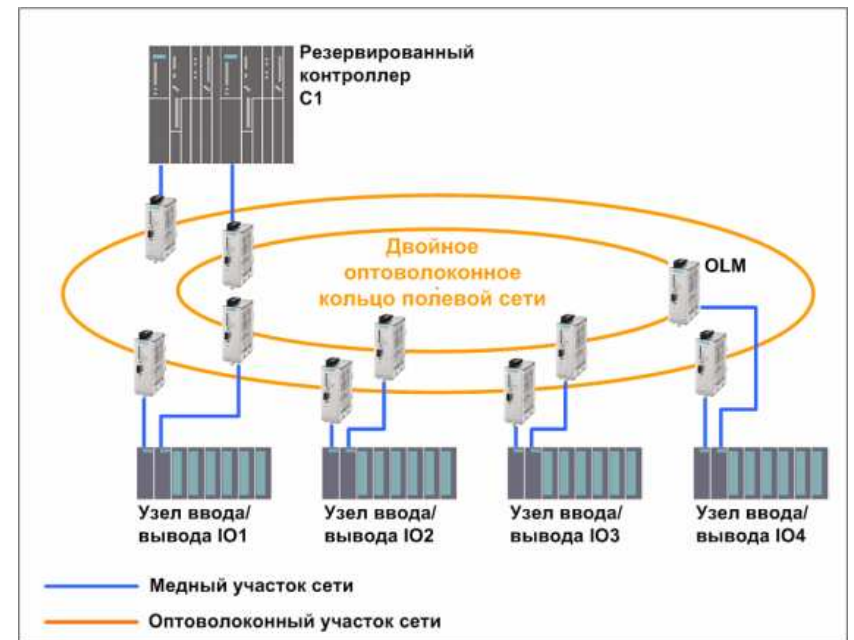


Рис. 5. Резервированное оптоволоконное кольцо

### 2.1.6. Промышленные сети верхнего уровня

Сети верхнего уровня служат для передачи данных между контроллерами, серверами и операторскими рабочими станциями (SCADA, MES и ERP-систем). Иногда в состав таких сетей входят дополнительные узлы: центральный сервер архива, сервер промышленных приложений, инженерная станция и т.д.

Какие сети используются на верхнем уровне? В отличие от стандартов полевых шин, здесь особого разнообразия нет. Большинство сетей верхнего уровня, применяемых в АСУ ТП, базируется на стандарте Ethernet (IEEE 802.3) или на его более быстрых вариантах Fast Ethernet и Gigabit Ethernet. При этом, как правило, используется полный набор коммуникационных протоколов TCP/IP. В этом плане сети операторского уровня очень SCADA-систем похожи на обычные ЛВС, применяемые в офисных приложениях. Широкое промышленное применение сетей Ethernet обусловлено следующими очевидными моментами:

1. Промышленные сети верхнего уровня объединяют множество операторских станций и серверов, которые в большинстве случаев представляют собой персональные компьютеры. Стандарт Ethernet отлично подходит для организации подобных ЛВС, т.к. контроллеры имеют встроенные интерфейсы для подключения к сетям Ethernet.

2. Сети Ethernet обладают большой скоростью передачи данных, что является чрезвычайно важным моментом для промышленных приложений. Например, стандарт Gigabit Ethernet позволяет передавать данные со скоростью до 1 Gb в секунду при использовании витой пары категории 5.

3. Очень частым требованием является возможность состыковки сети АСУ ТП с локальной сетью предприятия. Как правило, существующая ЛВС предприятия базируется на стандарте Ethernet. Использование единого сетевого стандарта позволяет упростить интеграцию АСУ ТП в общую сеть предприятия, что становится особенно ощутимым при реализации систем верхнего уровня типа MES-систем.

Однако у промышленных сетей верхнего уровня есть своя специфика, обусловленная условиями промышленного применения. Типичными требованиями, предъявляемыми к таким сетям, являются:

1. Большая пропускная способность и скорость передачи данных. Объем трафика напрямую зависит от многих факторов: количества архивируемых и визуализируемых технологических переменных, количества серверов и операторских станций, используемых приклад-

ных приложений и т.д.

В отличие от полевых сетей жесткого требования детерминированности здесь нет: строго говоря, неважно, сколько времени займет передача сообщения от одного узла к другому – 100 мс или 700 мс (естественно, это не важно, пока находится в разумных пределах). Главное, чтобы сеть в целом могла справляться с общим объемом трафика за определенное время. Наиболее интенсивный трафик идет по участкам сети, соединяющим серверы и операторские станции (клиенты). Это связано с тем, что на операторской станции технологическая информация обновляется в среднем раз в секунду, причем передаваемых технологических параметров может быть несколько тысяч. Но и тут нет жестких временных ограничений: оператор не заметит, если информация будет обновляться, скажем, каждые полторы секунды вместо положенной одной. В то же время если контроллер (с циклом сканирования в 100 мс) столкнется с 500-миллисекундной задержкой поступления новых данных от датчика, это может привести к некорректной обработке алгоритмов управления.

2. Отказоустойчивость. Достигается, как правило, путем резервирования коммуникационного оборудования и линий связи по схеме  $2*N$  так, что в случае выхода из строя коммутатора или обрыва канала, система управления способна в кратчайшие сроки (не более 1-3 с) локализовать место отказа, выполнить автоматическую перестройку топологии и перенаправить трафик на резервные маршруты. Далее мы более подробно остановимся на схемах обеспечения резервирования.

3. Соответствие сетевого оборудования промышленным условиям эксплуатации. Под этим подразумеваются такие технические меры, как: защита сетевого оборудования от пыли и влаги; расширенный температурный диапазон эксплуатации; увеличенный цикл жизни; возможность удобного монтажа на DIN-рейку; низковольтное питание с возможностью резервирования; прочные и износостойкие разъемы и коннекторы. По функционалу промышленное сетевое оборудование практически не отличается от офисных аналогов, однако, ввиду специального исполнения, стоит несколько дороже.





**Рис. 1.** Промышленные коммутаторы SCALANCE X200 производства Siemens (слева) и LM8TX от Phoenix Contact (справа): монтаж на DIN-рейку; питание от 24 V DC (у SCALANCE X200 возможность резервирования питания); поддержка резервированных сетевых топологий

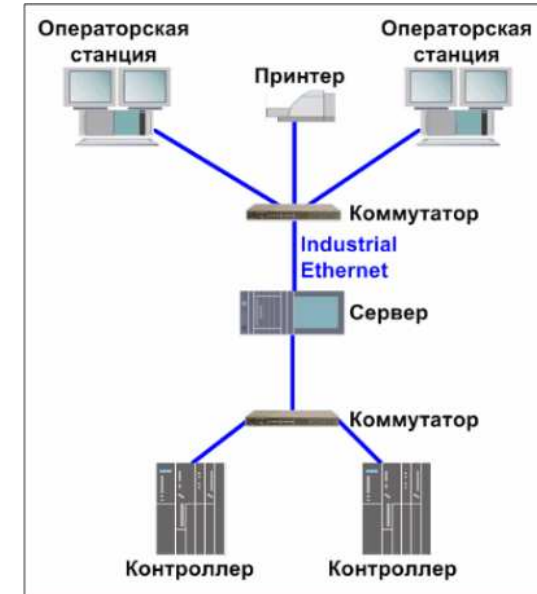
Говоря о промышленных сетях, построенных на базе технологии Ethernet, часто используют термин Industrial Ethernet, намекая тем самым на их промышленное предназначение. Сейчас ведутся обширные дискуссии о выделении Industrial Ethernet в отдельный промышленный стандарт, однако на данный момент Industrial Ethernet – это лишь перечень технических рекомендаций по организации сетей в производственных условиях, и является, строго говоря, неформализованным дополнением к спецификации физического уровня стандарта Ethernet.

Есть и другая точка зрения на то, что такое Industrial Ethernet. Дело в том, что в последнее время разработано множество коммуникационных протоколов, базирующихся на стандарте Ethernet и оптимизированных для передачи критичных ко времени данных. Такие протоколы условно называют протоколами реального времени, имея в виду, что с их помощью можно организовать обмен данными между распределенными приложениями, которые критичны ко времени выполнения и требуют четкой временной синхронизации. Конечная цель – добиться относительной детерминированности при передаче данных. В качестве примера Industrial Ethernet можно привести: Profinet; EtherCAT, Ethernet Powerlink, Ether/IP.

Эти протоколы в различной степени модифицируют стандартный стек TCP/IP, добавляя в него новые алгоритмы сетевого обмена, диагностические функции, методы самокорректировки и функции синхронизации, оставляя при этом канальный и физический уровни Ethernet неизменными. Это позволяет использовать новые протоколы передачи данных в существующих сетях Ethernet с использованием стандартно-

го коммуникационного оборудования.

Теперь рассмотрим конкретные конфигурации сетей операторского уровня. На рис. 2 показана самая простая – базовая конфигурация. Отказ любого коммутатора или обрыв канала связи (link) ведет к нарушению целостности всей системы.



**Рис. 2.** Нерезервированная конфигурация сети верхнего уровня

Такая простая конфигурация подходит лишь для систем управления, внедряемых на некритичных участках производства, что не подходит для более ответственных технологических участков.

На рисунке 3 показана отказоустойчивая конфигурация с полным резервированием. Каждый канал связи и сетевой компонент резервируется. Обратите внимание, сколько отказов переносит система прежде, чем теряется коммуникация с одной рабочей станцией оператора. Но даже это не выводит систему из строя, так как остается в действии вторая, страхующая рабочая станция.

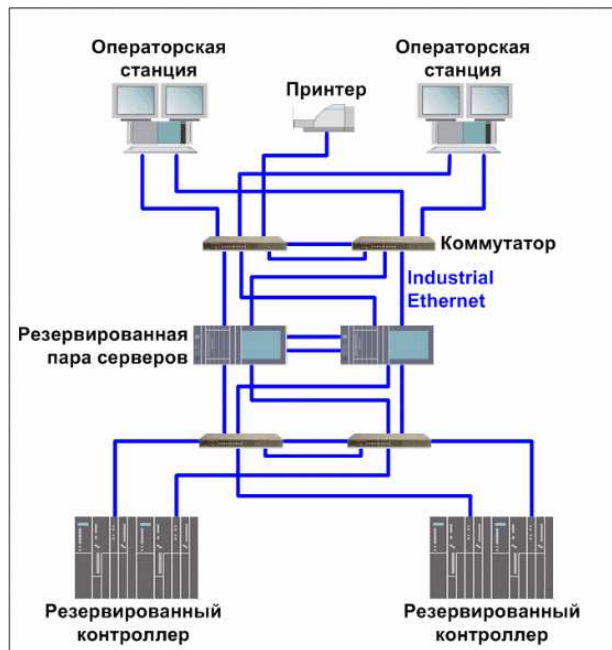


Рис. 3. Полностью резервированная конфигурация сети верхнего уровня

Резервирование неизбежно ведет к возникновению петлевидных участков сети – замкнутых маршрутов. Стандарт Ethernet, строго говоря, не допускает петлевидных топологий, так как это может привести к закликиванию пакетов особенно при широковещательной рассылке. Но и из этой ситуации есть выход. Современные коммутаторы, как правило, поддерживают дополнительный протокол Spanning Tree Protocol (STP, IEEE 802.1d), который позволяет создавать петлевидные маршруты в сетях Ethernet. Постоянно анализируя конфигурацию сети, STP автоматически выстраивает древовидную топологию, переводя избыточные коммуникационные линии в резерв. В случае нарушения целостности построенной таким образом сети (обрыв связи, например), STP в считанные секунды включает в работу необходимые резервные линии, восстанавливая древовидную структуры сети. Примечательно то, что этот протокол не требует первичной настройки и работает автоматически. Есть и более мощная разновидность данного протокола Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP, IEEE 802.1w), позво-

ляющая снизить время перестройки сети вплоть до нескольких миллисекунд. Протоколы STP и RSTP позволяют создавать произвольное количество избыточных линий связи и являются обязательным функционалом для промышленных коммутаторов, применяемых в резервированных сетях.

На рисунке 4 изображена резервированная конфигурация сети верхнего уровня, содержащая оптоволоконное кольцо для организации связи между контроллерами и серверами. Иногда это кольцо дублируется, что придает системе дополнительную отказоустойчивость.

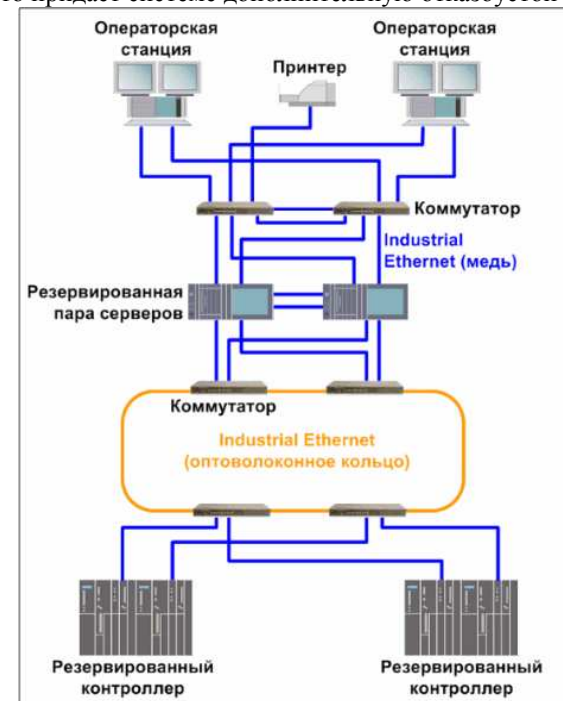


Рис. 4. Резервированная конфигурация сети на основе оптоволоконного кольца

Мы рассмотрели наиболее типичные схемы построения сетей, применяемых в промышленности. Вместе с тем следует заметить, что универсальных конфигураций сетей попросту не существует: в каждом конкретном случае выбирается подходящее техническое решение исходя из поставленной задачи и условий применения.

## 2.2. Средства и устройства ввода

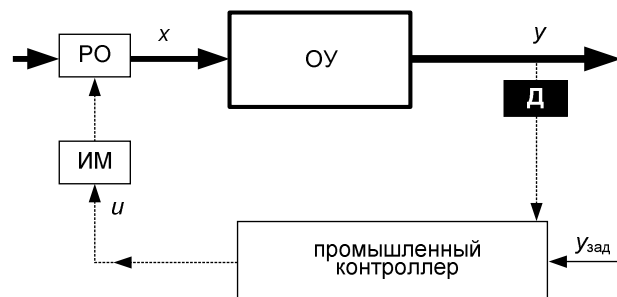
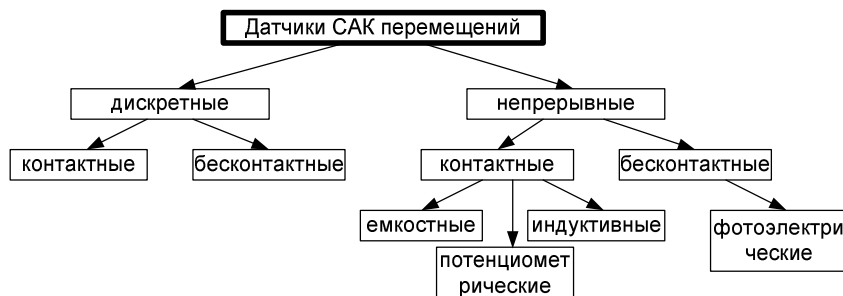


Рис. 1. Расположение датчиков (измерительных преобразователей) в структурной схеме локальной САУ

### 2.2.1. Первичные преобразователи (датчики) перемещений

Предназначены для контроля *линейных* и *угловых* перемещений. Они являются достаточно универсальными: их можно использовать и самостоятельно, и как составные узлы более сложных первичных преобразователей (давления, уровня, температуры, расхода). Получили широкое распространение в промышленности, т.к. большое число всех контролируемых переменных приходится на линейные и угловые перемещения.

По характеру выходного сигнала датчики, используемые в САК перемещений, классифицируют:

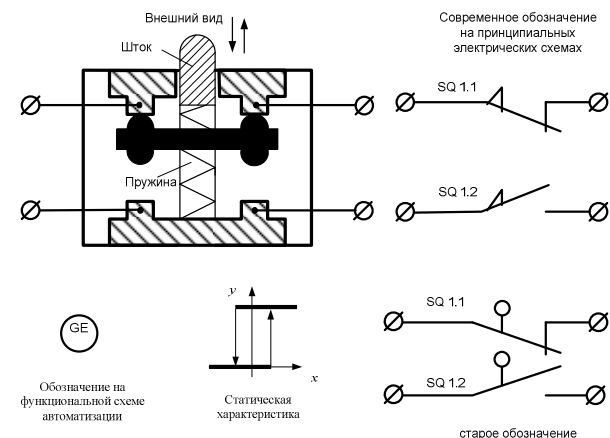


### Дискретные контактные датчики перемещений

Основным контактным датчиком является конечный выключатель. При нажатии на шток нормально закрытый контакт SQ1.1. разрывается, а нормально открытый контакт SQ1.2 закрывается. При снятии нажатия пружина возвращает шток в исходное положение. Связь контактов – механическая.

*Достоинство:* простота конструкции, большие мощности и амплитуды сигнала.

*Недостатки:* худшие по сравнению с непрерывными датчиками статические и динамические характеристики.

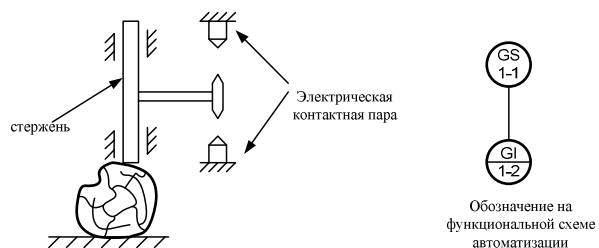


Оба типа датчиков применяются как для командных, так и для измерительных операций:

а) *командные операции* – предназначены для ограничения хода узлов механизмов и станков. Воздействие на конечные выключатели происходит при помощи разнообразных упоров (кулачки)



б) *измерительные операции* – предназначены для измерения линейных размеров изделий или величины перемещения рабочих органов. При этом датчики настраиваются на данный размер по образцовым деталям.



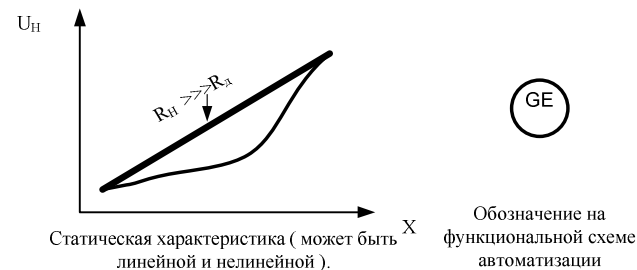
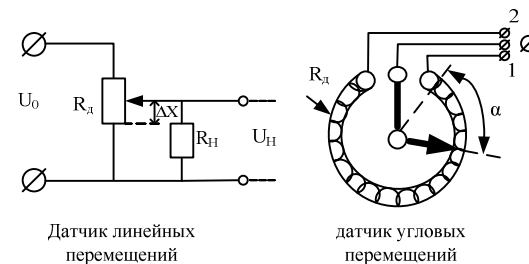
Широко применяются в промышленности в контрольно-сортировочных автоматах для сортировки по размерам на три или более групп.

### Непрерывные датчики перемещений

#### а) Потенциометрические датчики (реостатные)

Применяются для измерения линейных и угловых перемещений.

*Принцип действия:* при изменении положения токосъемного контакта переменного сопротивления изменяется его сопротивление  $R_d$ .



Чувствительность:

линейных

угловых

$$S = \frac{\Delta U_n}{\Delta x} \quad [\text{В/мм}]$$

$$S = \frac{\Delta U_n}{\Delta \alpha} \quad [\text{В/рад}]$$

*Недостаток:* скользящий контакт (возможен обрыв провода обмотки).

#### б) Индуктивные датчики (электромагнитные)

Применяются для измерения линейных и угловых перемещений.

*Принцип действия:* при изменении положения ферромагнитного якоря изменяется индуктивное сопротивление катушки

б1) простейший датчик



закон Ома 
$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$X_L = 2\pi f \cdot L$$

в свою очередь  $L = f(\delta, \mu_0, S)$

где  $\delta$  – зазор

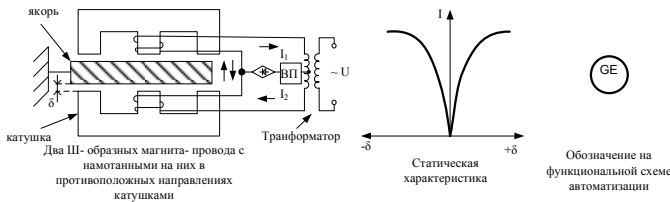
$\mu_0$  – магнитная проницаемость

$S$  – площадь сечения

В конечном итоге  $I = f(\delta)$

Датчики работают при частоте питания сети от  $f = 50-5000$  Гц

б2) дифференциальный индуктивный датчик. Состоит из двух простейших (нереверсивных) датчиков



При среднем положении якоря индуктивные сопротивления катушек одинаковы, величины токов в катушке равны ( $I_1 = I_2$ ) и результирующий ток во вторичном приборе (ВП) равен 0. При отклонении якоря на  $\delta$  появляется разность токов в обмотках катушки, который фиксируется ВП.

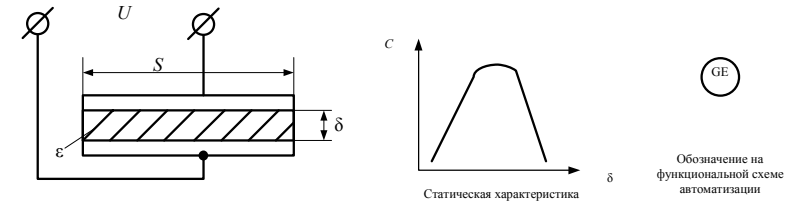
*Статическая характеристика:* имеет большой линейный участок по сравнению с простейшим датчиком, что позволяет увеличить рабочее перемещение якоря.

*Достоинства:*

- компенсация колебаний напряжения и окружающей среды;
- чувствительность в два раза выше, чем у простейшего датчика.

### в) Емкостные датчики

*Принцип действия:* при изменении площади перекрытия пластин  $S$  конденсатора или расстояния  $\delta$  между ними изменяется его емкость  $C$ .



$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi\delta} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^5} \quad [\text{мкФ}]$$

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м

$S$  – площадь перекрытия пластин, см<sup>2</sup>

$\delta$  – расстояние между пластинами, см.

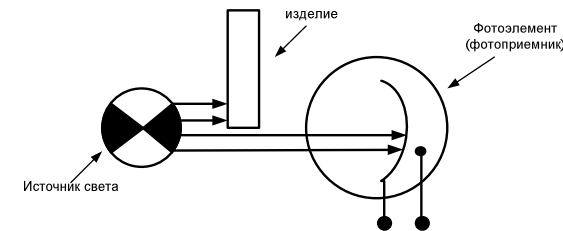
Для хорошей работы требуют повышенной частоты питания (выше 1000 Гц). Кроме измерения перемещений используются для систем автоматического контроля уровня и влажности.

### г) Фотоэлектрические датчики (бесконтактные)

Применяются для измерения длины, контроля состояния поверхности, учета (подсчета) продукции.

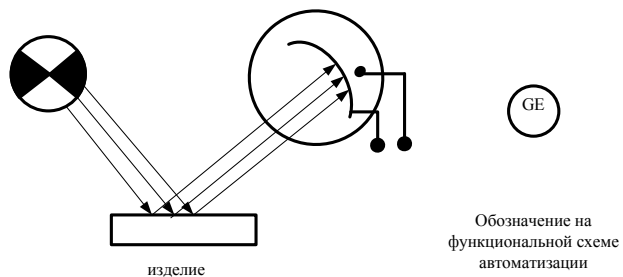
*Принцип действия:* изменение электрических характеристик датчика под действием потока света.

а) контроль линейных размеров, учет продукции [м.б. для защиты рук]



Световой поток пересекается с движущимся изделием полностью, или частично экранируя его.

б) контроль состояния поверхности

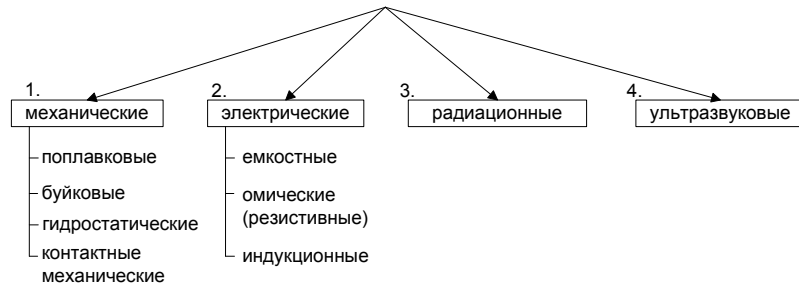


Световой поток частично поглощается и частично отражается от изделия.

## 2.2.2. Первичные преобразователи (датчики) уровня

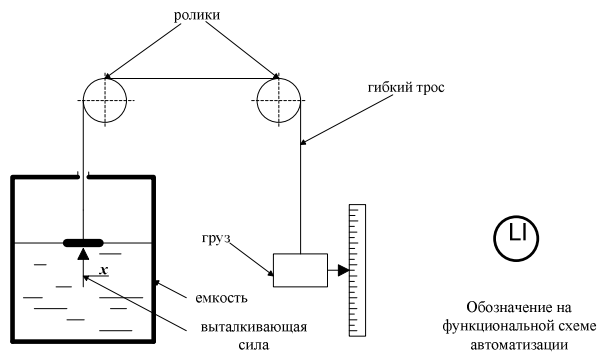
Назначение: контроль за положением уровня в аппарате, определение количества вещества в емкости.

Подразделяют



### 1. Механические

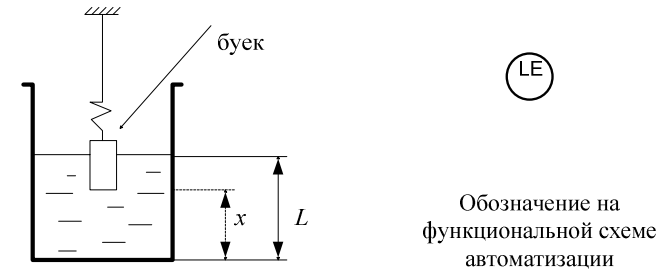
а) **Поплавковые датчики** – перемещение поплавка  $x$  механически передается указателю прибора. Погрешность мало зависит от плотности и температуры жидкости  $\approx \pm 1\text{мм}$ .



б) **Буйковые датчики** – перемещение буйка  $x$  равно

$$x = \frac{L}{1 + \frac{z}{S \cdot \rho \cdot g}}$$

где  $L$  – уровень жидкости;  
 $z$  – жесткость пружины;  
 $S$  – площадь контакта;  
 $\rho$  – плотность жидкости;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

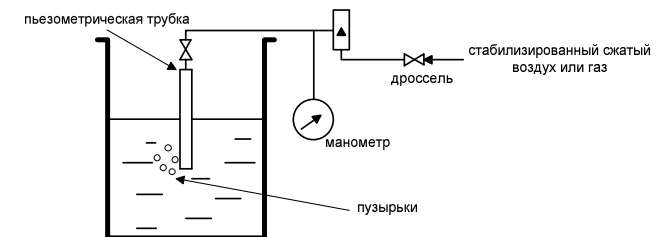


в) **Гидростатические датчики.** К ним относятся

- в<sub>1</sub>) пьезометрические;
- в<sub>2</sub>) дифманометрические.

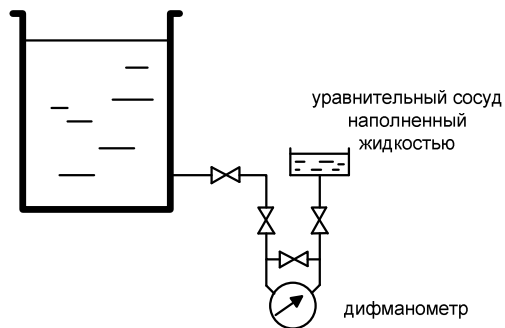
*Пьезометрические* – воздух (газ) через ротаметр подается в пьезометрическую трубку. Давление воздуха (газа)  $P$  измеряется манометром и характеризует положение уровня  $L$  в емкости.

$$P = f(L)$$



*Дифманометрические* – уравнительный сосуд обеспечивает постоянный столб в одном колене дифманометра, высота столба в другой меняется с изменением уровня в емкости.

$$\Delta P = f(L)$$



г) **контактно-механические датчики** – используется эффект торможения, возникающего в процессе соприкосновения среды с чувствительным элементом (зондом, щупом, крыльчаткой).

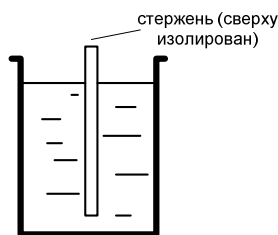
Точность измерения уровня сыпучих и консистентных сред  $\pm 10$  мм

## 2. Электрические датчики

а) **емкостные** – используют диэлектрические свойства контролируемых сред, т.е. токопроводящие жидкости (масла, бензин, керосин). Применяются цилиндрические и плоские емкостные датчики. Цилиндрический (работает как конденсатор):

2 цилиндра: 1-й – сама емкость  
2-й – стержень

В зависимости от уровня  $L$  изменяется емкость  $C$   
 $C = f(L)$



Плоский: бак + электроды.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d}$$

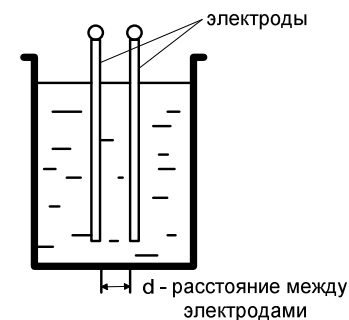
где  $S$  – площадь;  $S = L A$

где  $L$  – уровень

$A$  – ширина пластины электрода

$d$  – расстояние между электродами

$\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость



$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{воздуха}} \cdot (L-h) \cdot A}{d} + \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{жидкости}} \cdot h \cdot A}{d} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} [\epsilon_{\text{воздуха}} (L-h) + \epsilon_{\text{жидкости}} \cdot h]$$

$$\epsilon_{\text{жидкости}} \approx 80 \epsilon_{\text{воздуха}}$$

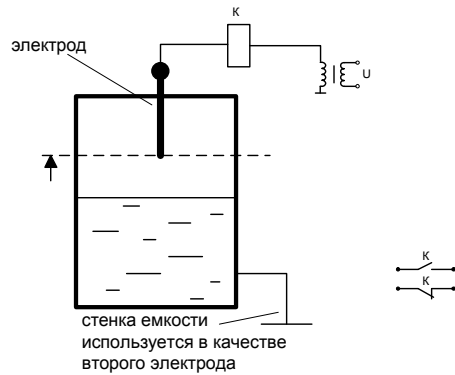
Токопроводящие жидкости – стержень изолируется электроизоляционным слоем.

б) **омические датчики** – работа основана на замыкании электрической цепи через контролируемую среду.

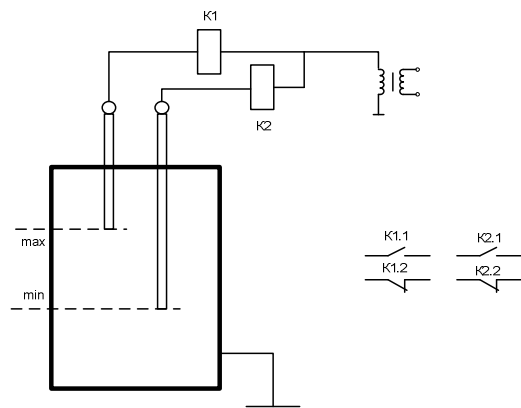
Применение: сигнализация уровня жидкости электропроводных жидкостей.

Одноэлектродный – на 1 уровень

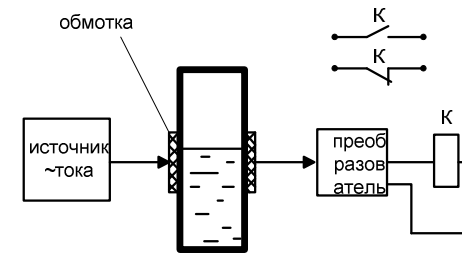




2-х электродный – для нескольких уровней



**в) индукционные датчики.** Обмотка, располагаемая снаружи трубы и питается источником переменного тока  $I$ , располагается так, чтобы при изменении уровня жидкости попадала в магнитное поле  $X_L = f(L)$  сигнал с преобразователя подается на катушку реле  $K$ .

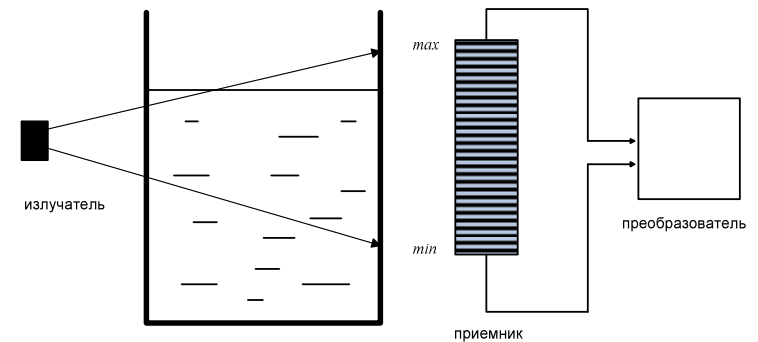


### 3. Радиационные датчики

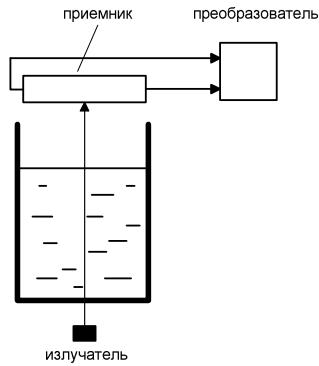
Работа основана на использовании явления изменения мощности излучения, проходящего через емкость от источника к приемнику при наличии или отсутствии контролируемого вещества (чаще  $\gamma$ -излучения).

Варианты

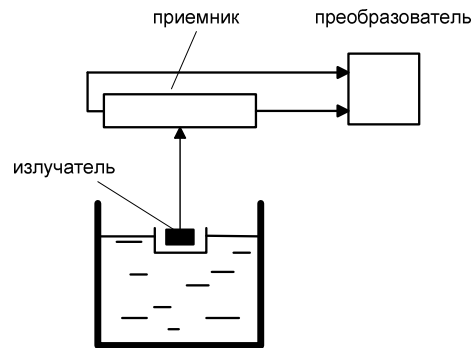
Максимального или минимального уровня (излучатель и приемник неподвижны).



Непрерывное измерение уровня (для небольшого уровня до 1 метра)

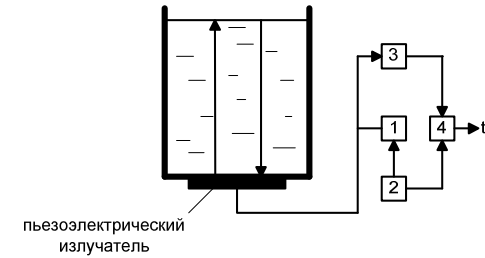


То же: только излучатель находится на поплавке.



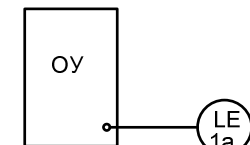
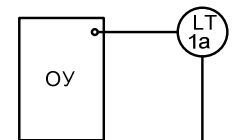
#### 4. Ультразвуковые датчики

Работа основана на принципе отражения ультразвуковых колебаний со стороны жидкости. Уровень жидкости определяют по времени запаздывания отраженного сигнала относительно посланного  $t = f(L)$



- 1 – генератор импульсов;
- 2 – задающий генератор;
- 3 – приемный усилитель;
- 4 – измеритель времени.

#### Типовые функциональные схемы систем автоматического контроля уровня



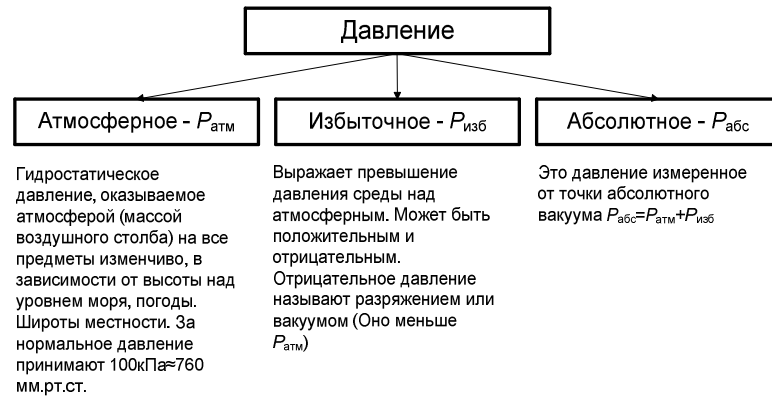
- а) САК уровня (max или min значения)
- 1а – передающий преобразователь
- 1б – вторичный прибор

- б) САК уровня жидкости (min или max значения) электронным (емкостным) уровнемером
- 1а – датчик
- 1б – электронный блок
- 1в – вторичный прибор

### 2.2.3. Первичные преобразователи (датчики) давления

[P.S. Давление – величина, характеризующая интенсивность сил, действующих на какую-либо часть поверхности тела по направлению, перпендикулярным к этой поверхности.]

Существует три понятия давления:



Единицы измерения:

СИ  $\rightarrow$  1 Па (паскаль) – равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной на площади  $1\text{ м}^2$ .

На многих отечественных приборах находятся в эксплуатации приборы отградуированные в:  $\text{кгс}/\text{см}^2$ ,  $\text{кгс}/\text{м}^2$ , мм. рт. ст.

$$1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 98066,5 \text{ Па} \approx 0,1 \text{ МПа}$$

$$1 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 9,80665 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$$

$$1 \text{ бар} = 105 \text{ Па}$$

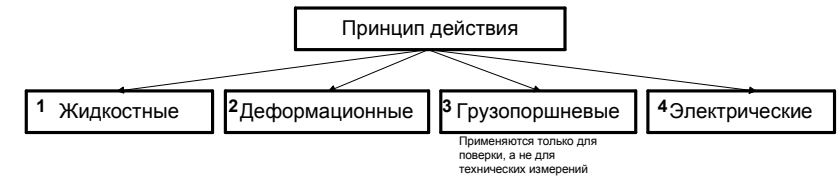
Приборы для измерения давления классифицируются (по роду измеряемого давления):

- *барометры* – приборы для измерения барометрического давления атмосферного воздуха;
- *манометры* – приборы для измерения абсолютного и избыточного давления;
- *вакуумметры* – приборы для измерения разрежения (вакуума);
- *мановакуумметры* – приборы для измерения избыточного давления и разрежения;
- *напорометры* – приборы для измерения малых избыточных

давлений;

- *тягомеры* – приборы для измерения малых разрежений;
- *тягонапорометры* – приборы для измерения малых давлений и разрежений;
- *дифференциальные манометры (дифманометры)* – приборы для измерения разности двух давлений (перепада давления). Используются для измерения расходов (в качестве расходомеров) и других технологических величин.

По принципу действия приборы для измерения давления подразделяются:



#### 1. Жидкостные приборы

*Принцип действия* основан на законе Паскаля: уровни жидкостей в сообщающихся сосудах при одинаковых давлениях в обоих сосудах лежат в одной горизонтальной поверхности т.е. при  $P_1 = P_2$   $H_1 = H_2$

а) U – образный манометр

Под действием давления  $P_{абс}$  подведенному к одному из концов прибора образуется разность уровней  $h$ .

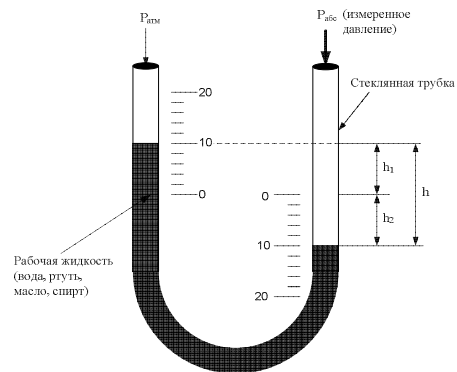
$$\text{Тогда } P_{абс} = P_{атм} + h \cdot \rho \cdot g$$

$$P_{изб} = P_{абс} - P_{атм} = h \cdot \rho \cdot g$$

где  $\rho$  – плотность рабочей жидкости

$g$  – ускорение свободного падения.

Погрешность равна  $\pm 2$  мм столба рабочей жидкости.

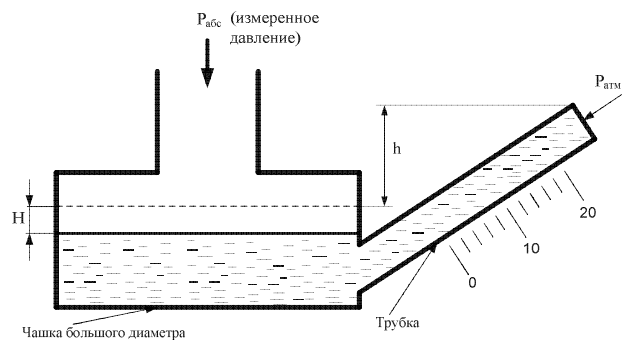


б) Чашечный манометр с наклонной трубкой (разновидность  $U$  – образного манометра)

$$P_{\text{изб}} = (H+h) \cdot \rho \cdot g \quad \{H \approx 0\}$$

Принцип тот же и у  $U$  – манометра.

Длина шкалы 250 мм. Цена деления 1 мм.



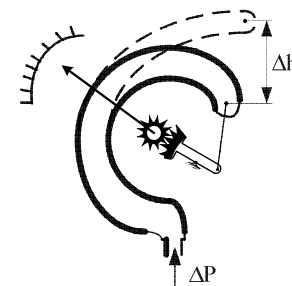
## 2. Деформационные приборы (манометры)

В промышленности получили широкое распространение. Диапазон измерений  $0 \div 160$  Па;  $0 \div 1000$  МПа.

Принцип действия: уравнивание измеряемого давления силами упругих деформаций чувствительных элементов (трубчатая пружина [трубка Бурдона], мембрана, сильфон).

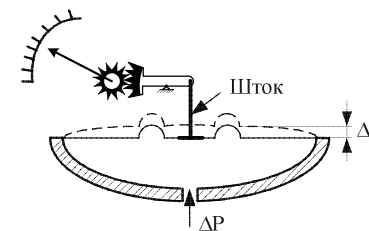
а) *трубчатая пружина*. Изменение давления  $P$  вызывает деформацию трубки и перемещение ее свободного конца. (При подаче на

вход манометра  $P_{\text{изб}}$  трубка разжимается, а при подаче разрежения сжимается).



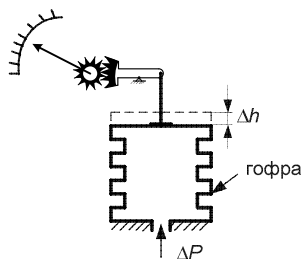
б) *мембрана*. Изготавливается в виде тонкой пластинки из нержавеющей стали, резины, пластмассы.

Недостаток: небольшой ход чувствительного элемента



в) *сильфон* – гофрированный тонкостенный сосуд, выполненный из упругого материала (латунь, коррозионноустойчивая сталь). Обычно число гофр  $4 \div 24$ .

Длина  $13 \div 100$  мм. Диаметр  $12 \div 100$  мм. Рабочий ход сильфона  $2 \div 21$  мм.



Для всех трех случаев:  $\Delta h = k \cdot \Delta P$

где  $k$  – коэффициент усиления трубчатой пружины, мембраны или сильфона, соответственно.

Деформация чувствительных элементов может преобразовываться в электрический сигнал с помощью преобразователей перемещений (потенциметрического, индуктивного, емкостного, тензометрического).

### 3. Грузопоршневые приборы

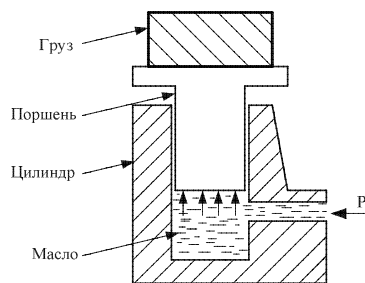
*Принцип действия:* основан на уравнивании сил, создаваемых с одной стороны измеряемым давлением, а с другой стороны грузом и поршнем.

О величине давления судят по величине массы грузов и поршня, а по перемещению поршня.

Высокая точность (кл. точности 0,02÷0,2).

Широкий диапазон (0,1÷100 МПа).

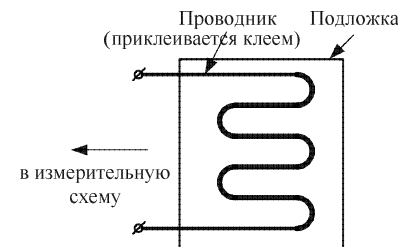
Применение: в основном для поверки и градуировки.



### 4. Электрические приборы

*Принцип действия:* на основе прямого или косвенного преобразования давления в электрическую величину, дифференциально связанную с давлением.

Типичный представитель – тензометрический датчик (тензодатчик). Его работа основана на изменении активного сопротивления проводочных проводников при их механической деформации. Для проводника используют константан, нихром, никель, висмут.



*Достоинства:*

- небольшие габариты и малая масса;
- безинерционность;
- простота применения и возможность размещать в труднодоступных местах;
- стабильность работы.

*Недостатки:*

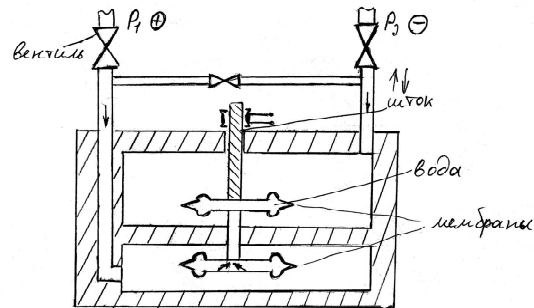
- малая величина изменения сопротивления;
- температурная погрешность.

### Измерение перепада давлений

На практике часто необходимо измерить *перепад давлений*. Для этого используют дифференциальные манометры. Наиболее часто используются сильфонные и мембранные дифманометры. Они имеют малую инерционность и практически неограниченный верхний предел измерения.

Принцип их действия основан на работе деформационных приборов измерения давления.

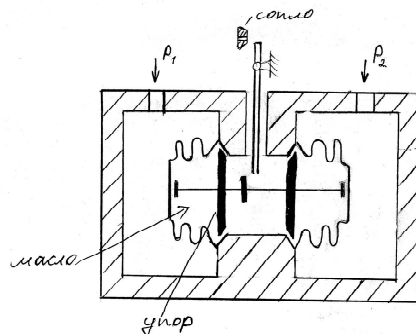
а) мембранный дифманометр



Принцип действия: две сообщающиеся между собой мембраны, внутри которых находится вода. Под действием разности давлений нижняя мембранная коробка сжимается, и жидкость из неё перетекает в верхнюю коробку. Коробка увеличивается в объёме и перемещает вверх шток, являющийся сердечником дифференциально-трансформатного датчика. В результате этого во вторичной обмотке индукционной катушки изменяется напряжение и фаза выходного сигнала. Сигнал идёт на вторичный прибор.

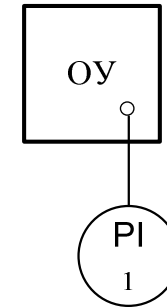
б) сильфонный дифманометр.

Два связанных между собой сильфона, заполненных маслом, и два упора для ограничения хода движения.

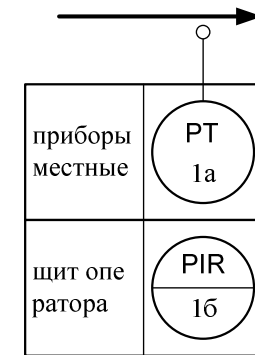


**Типовые функциональные схемы систем автоматического контроля давления**

а) измерение давления в ОУ пружинным манометром 1



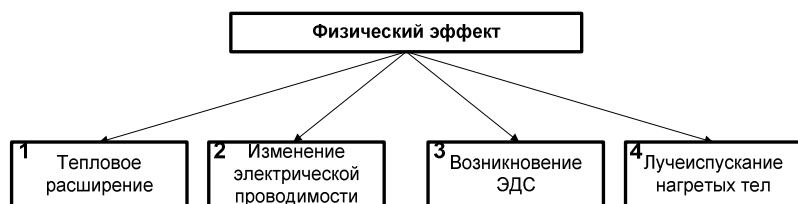
б) измерение давления в трубопроводе



1а - первичный преобразователь (сильфонный манометр)  
1б - вторичный прибор

## 2.2.4. Первичные преобразователи (датчики) температуры

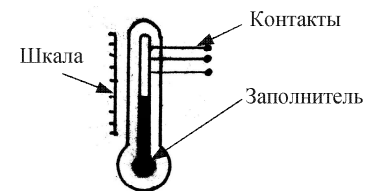
Разнообразие условий эксплуатации, широкий диапазон температур обуславливают применение различных методов измерения, использующих физические эффекты, происходящие в веществах под действием температуры. Их можно классифицировать:



Контактные методы (1,2,3)	Бесконтактный метод (4)
<p><i>Достоинство:</i> простота, более высокая точность по сравнению с бесконтактными методами.</p> <p><i>Недостатки:</i> оказывают влияние на температуру среды или тела.</p> <p>Диапазон: <math>-260\text{ C} - +2200\text{ C}</math></p>	<p><i>Достоинства:</i> не оказывает влияния на температуру среды или тела.</p> <p><i>Недостатки:</i> сложность, выше погрешности.</p> <p>Диапазон: <math>+20\text{ C} - 4000\text{ C}</math></p>

1. Эффект теплового расширения. Принцип действия: основан на зависимости объемного расширения (жидкости, газа) от температуры

а) стеклянный термометр

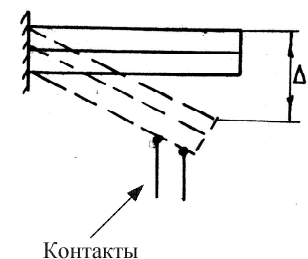


Диапазон:  $-100\text{ C} - 600\text{ C}$

*Достоинства:* высокая точность, дешевизна.

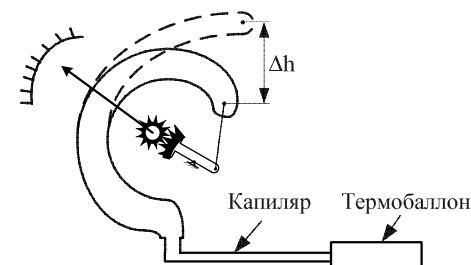
*Недостатки:* хрупкие, не ремонтпригодны, невозможность передавать показания на расстоянии

б) биметаллический термометр



Две спаянные пластинки с различными коэффициентами теплового расширения. Изгибаясь, замыкают контакты. Используются как тепловые реле.

в) манометрический термометр



Принцип действия: изменение давления (объема) вещества в

замкнутом объеме в зависимости от температуры. Основан на использовании закона Клайперона.

Основные компоненты:

- термобаллон – выполнен из коррозионной стали;
- капилляр – медная или стальная трубка.

Условия достоверности показаний: полное погружение термобаллона в окружающую среду. Диапазон измерения:  $-200 - 600^{\circ}\text{C}$ .

*Достоинства:*

- возможность применения в пожаро- и взрывоопасных условиях;
- обладает хорошей вибростойкостью, нечувствителен к внешним магнитным полям.

*Недостатки:*

- невысокая точность (класс точности 1,5 и 2,5);
- большие размеры чувствительных элементов: длина 80-630 мм, диаметр 16 и 20 мм;

2. Эффект изменения электрической проводимости. Принцип действия: основан на свойстве проводника (или полупроводника) изменять свое сопротивление при изменении температуры.



Термометр сопротивления.  
Диапазон измерения:  $- 260 - 1100^{\circ}\text{C}$ .  
Широко применяются термометры сопротивления:  
– платиновые ТСП с условной градуировкой 20, 21, 22 ( $T = -200 - 650^{\circ}\text{C}$ )  
– медные ТСМ гр. 23,24 ( $T = -50 - 180^{\circ}\text{C}$ )

*Достоинства:*

- высокая точность (ниже чем у стеклянных термометров, но выше чем у термоэлектрических преобразователей);
- стабильность характеристики преобразования;
- возможность измерять криогенные температуры ( $-220^{\circ}\text{C}$ ).

*Недостатки:*

- большие размеры чувствительного элемента, не позволяющие измерять температуру в точке (диаметр 6-20 м, длина 50-18 мм)

3. Эффект возникновения электродвижущей силы (термоэлектрические преобразователи – термопара).

*Принцип действия:* основан на зависимости термоЭДС от значений температур мест соединения двух разнородных проводников.



Образование термоЭДС в термопаре объясняется, тем что при нагревании электроны на «горячем» спае ( $t_1$ ) приобретают более высокие скорости, чем на «холодном» ( $t_2$ ). В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному. На «холодном» накапливается отрицательный заряд, на «горячем» – положительный. Разность этих потенциалов определяет термоЭДС термопары.

Диапазон измерений (широкий)  $-200^{\circ}\text{C} - 2200^{\circ}\text{C}$

*Достоинства:*

- малые габаритные размеры (от 0,5 мм) т.е. могут измерять температуру в точке;
- высокая точность (ниже чем у термометров сопротивления)

*Недостатки:*

- необходимость применения специальных термоэлектродных проводов для подключения термопар к прибору (КСП).

Широкое распространение получили термопары: ТХК (хромель-капель) до  $600^{\circ}\text{C}$ , ТХА (хромель-алюмель) до  $1000^{\circ}\text{C}$ .

4. Эффект лучеиспускания нагретых тел (бесконтактный метод).

*Принцип действия:* основан на изменении интенсивности (яркости) излучения и цвета при изменении температуры.

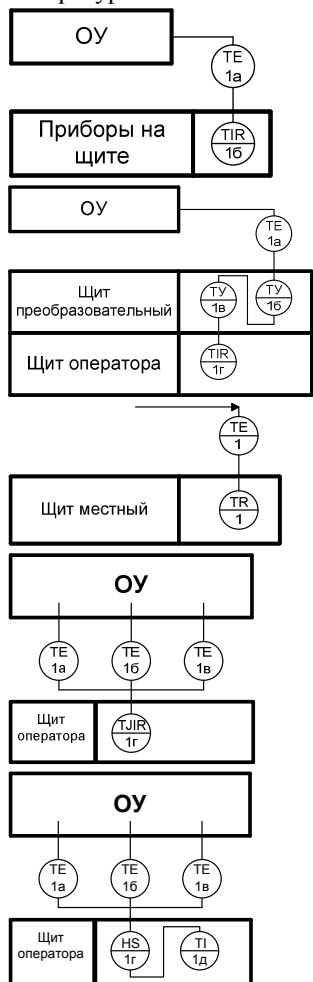
Пирометры излучения.

В качестве вторичных приборов (ВП) для этих датчиков используются:





Типовые функциональные схемы систем автоматического контроля температуры:



1а – термоэлектрический преобразователь (ТХК – 0515)  
1б – электронный потенциометр КСП-4

1а – термоэлектрический преобразователь (ТХА -0515)  
1б – токовый преобразователь  
1в – электропневматический преобразователь  
1г – вторичный прибор

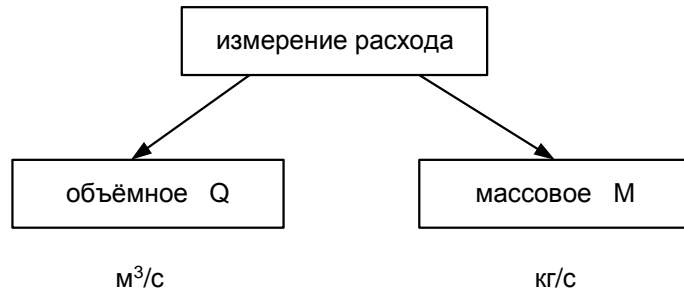
САК с использование монотермического термометра

САК с использованием многоточечного прибора  
1а-1в – термопреобразователи сопротивления (ТСП – 6097)  
1г –электронный мост КСМ4

1а –1в – термопреобразователи сопротивления  
1г – переключатель  
1д –милливольтметр

### 2.2.5. Первичные преобразователи (датчики) расхода

Расход – количество вещества (газа или жидкости) протекающее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени.



Связь между объёмным  $Q$  и массовым  $M$  расходом:

$$M = Q \rho$$

где  $\rho$  – плотность газа или жидкости.

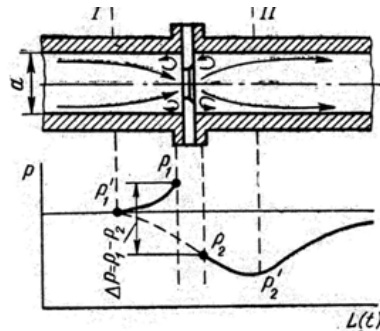
#### Расходомеры переменного перепада давления

(с сужающим устройством)

Принцип действия: измеряют перепад давлений  $\Delta P$ , который уменьшается в зависимости от расхода пропускаемого вещества (газ, жидкость).

Перепад давлений получают с помощью специальных устройств: диафрагма, сопло, сопло Вентури. Создают местное сопротивление в трубе.

Диафрагма:



первичный измерительный преобразователь (датчик) установленный по месту

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$P_1$  – давление до диафрагмы

$P_2$  – давление после диафрагмы.

$$\text{Объёмный расход } Q = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P} \text{ м}^3/\text{с}$$

где  $\alpha$  – коэффициент расхода, учитывает отношение диаметров трубопровода и сужающего устройства, степень сжатия потока;

$\varepsilon$  – коэффициент расширения струи, учитывает изменение плотности потока при прохождении через сужающее устройство;

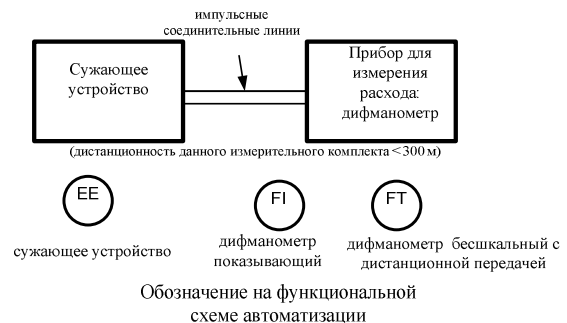
$\rho$  – плотность газа или жидкости (кг/м<sup>3</sup>);

$F_0$  – площадь внутреннего отверстия сужающего устройства (м<sup>2</sup>);

$\Delta P$  – перепад давлений на сужающем устройстве.

$$\text{Для массового расхода } M = Q \cdot \rho = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{2\rho \cdot \Delta P} \text{ кг/с}$$

В целом, для измерения расхода приборами переменного перепада давлений необходимо иметь:

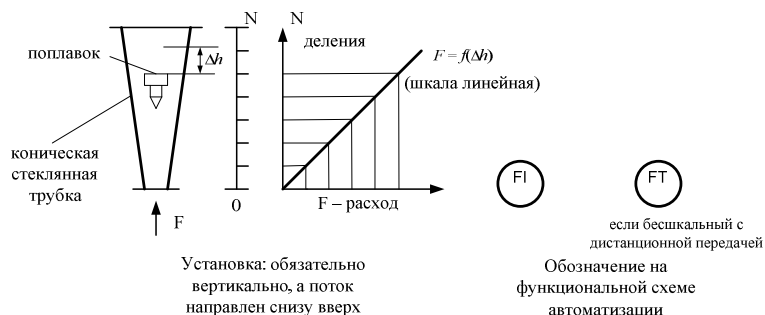


Обозначение на функциональной схеме автоматизации

[Дифманометры: см. раздел «САК давления»]

**Расходомеры постоянного перепада давления (жидкость, газ) – или расходомеры обтекания.**

*Принцип действия:* рабочая среда (жидкость, газ) обтекает чувствительный элемент прибора – поплавок. Наиболее распространённым типом такого типа расходомера является ротаметр.



*Принцип действия ротаметра:* гидродинамическое давление измеряемого потока  $F$  воздействует снизу на поплавок и вызывает его вертикальное перемещение до тех пор, пока он не установится на определенной высоте  $\Delta h$  (в зависимости от расхода  $F$ ). Под действием перемещения поплавка из-за конусности трубки изменяется площадь проходного сечения между поплавком и трубкой, а перепад давления по обе стороны поплавка остаётся постоянным (поэтому и называют расходомеры постоянного перепада давления).

**Достоинства:**

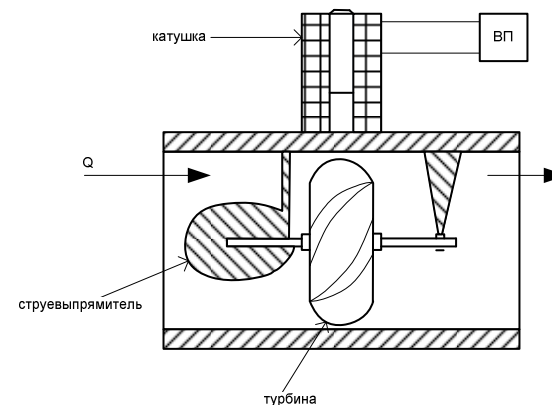
- высокая чувствительность;
- малая стоимость;
- простота конструкции и эксплуатации;
- можно использовать для агрессивных жидкостей и газов.

Имеются ротаметры с электрической или пневматической дистанционной передачей (т.е. бесшкальные).

**Тахометрические расходомеры**

**а) турбинные**

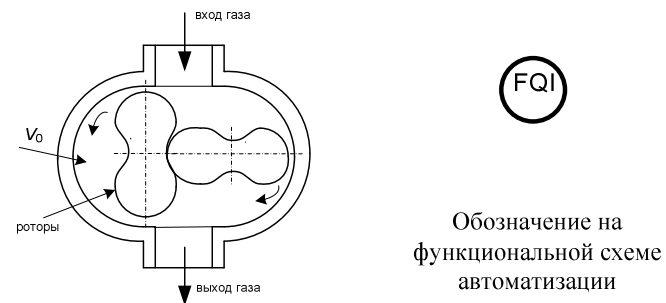
*Принцип действия:* частота вращения установленных в потоке элементов связана с расходом. Применяется для стационарных режимов движения несжимаемых жидкостей.



Поток жидкости при входе в устройство выравнивается струе-выпрямителем и направляется на лопасти турбины. В катушке индуктивности ЭДС измеряемая вторичным прибором. Используются как расходомеры и как счетчики.

**б) ротационные счетчики**

*Принцип действия:* под действием разности давлений на входе и выходе прибора роторы приводятся во вращение и обкатываются боковыми поверхностями. При этом суммируются единичные объемы газа  $V_0$ , вытесненных роторами из измерительной камеры прибора за определенный период времени.



Объем газа  $V$ , прошедший через прибор равен  $V = V_0 n$ ;  
где  $n$  – частота вращения роторов.

Выпускаются газовые счетчики типа РГ на расходы 40, 100, 250, 400, 600, 1000 м<sup>3</sup>/ч]

Погрешность показаний в пределах 10-100% номинального расхода составляет ±2%

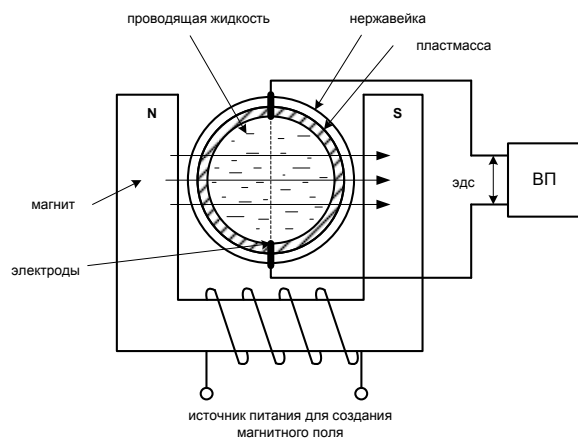
### **Индукционные расходомеры**

*Принцип действия* основан на законе Фарадея (закон электромагнитной индукции). При протекании в трубопроводе проводящей жидкости между полюсами магнита, то в направлении перпендикулярном направлению жидкости и в направлении основного магнитного потока возникает э.д.с.  $U$  на электродах, пропорциональная скорости движения жидкости  $v$ :

$$U = -Bdv$$

где  $B$  – магнитная индукция в зазоре полюсов магнита,

$d$  – внутренний диаметр трубопровода.



Если выразить через объемный расход  $Q$  через скорость  $v$ , т.е.

$$Q = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot v \quad \left[\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \text{площадь сечения}\right]$$

то  $U$  равно

$$U = -B \cdot \frac{4}{\pi \cdot d} \cdot Q; \text{ т.е. } U = f(Q)$$

#### Достоинство:

- обладают незначительной инерционностью показаний (что важно для САУ);

- нет частей, находящихся внутри рабочего трубопровода (поэтому они имеют минимальные гидравлические потери).

#### Недостатки:

- показания зависят от свойств измеряемой жидкости (вязкость, плотность) и характера потока (ламинарный, турбулентный);

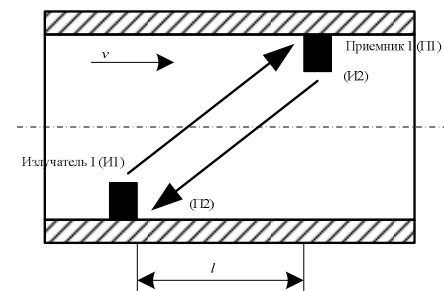
- присуще образование паразитных э.д.с. и явление поляризации электродов, при этом изменяется сопротивление датчика.

Сейчас выпускают индукционные расходомеры: ИР-51, 4РИМ, 5РИМ. Диапазон измерений 1.25-400 м<sup>3</sup>/ч. Основная погрешность 1-1.5%.

Измеряемые среды: щелочи, кислотные, абразивные жидкости и пульпы.

### **Ультразвуковые расходомеры.**

*Принцип действия:* скорость распространения ультразвука в движущейся среде газа или жидкости равна геометрической сумме средней скорости движения среды  $v$  и собственной скорости звука в этой среде.



Излучатель И создает ультразвуковые колебания частотой от 20 Гц и выше, которые попадают на приемник П, регистрирующий эти колебания (он расположен на расстоянии  $l$ ). Тогда расход потока  $F$  равен

$$F = \frac{S \cdot C^2 \cdot \Delta t}{2l \cdot k}$$

где  $S$  – площадь сечения потока жидкости;

$C$  – скорость звука в среде (для жидкости 1000-1500 м/с);

$\Delta t = t_2 - t_1$

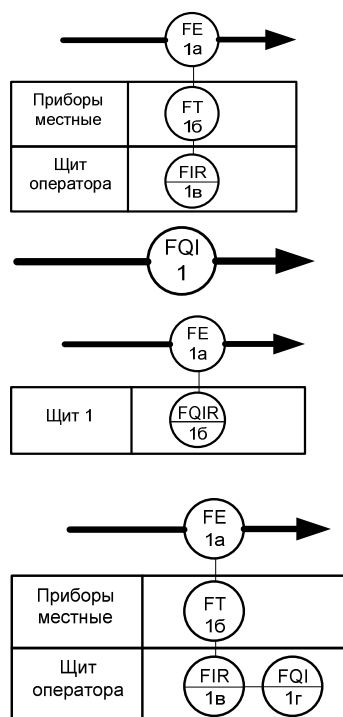
$t_1$  – продолжительность распространения звуковой волны по на-

правлению движения потока от излучателя И1 до приемника П1;  
 $t_2$  – продолжительность распространения звуковой волны против движения потока от излучателя И2 до приемника П2;  
 $l$  – расстояние между излучателем И и приемником П;  
 $k$  – коэффициент, учитывающий распределение скоростей в потоке.

Достоинства:

- а) высокая надежность и быстродействие;
- б) возможность измерения неэлектропроводных жидкостей.

### Типовые функциональные схемы систем автоматического контроля расхода



а) САК расхода газа (пара, жидкости)

1а – сужающее устройство  
 1б – передающий преобразователь расхода  
 1в – вторичный прибор

б) Измерение количества жидкости

1 – счетчик жидкости

в) САК расхода и количества жидкости

1а – сужающее устройство

1б – вторичный прибор (дифманометр)

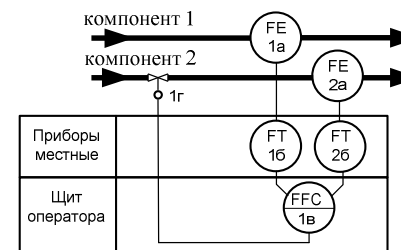
г) САК расхода количества жидкости

1а – сужающее устройство

1б – передающий преобразователь

1в – вторичный прибор

1г – интегратор пневматический



д) САК соотношения расходов двух компонентов

1а, 2а – сужающее устройство

1б, 2б – дифманометр бесшкальный

1в – регулятор соотношения расходов

1г – исполнительный механизм.

## 2.3. Средства и устройства обработки

### 2.3.1. Назначение, основные свойства и условия эксплуатации промышленных контроллеров

**Назначение и основные свойства.** Программируемый логический контроллер (ПЛК, PLC, промышленный контроллер) является автономным программируемым устройством сбора и обработки информации, а также базовым аппаратным средством уровня непосредственного цифрового управления (первый уровень АСУ).

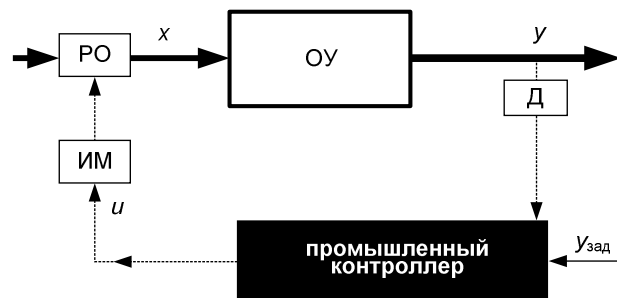


Рис. 1. Расположение промышленных контроллеров в структурной схеме локальной АСУ

Принцип работы контроллера состоит в выполнении следующего цикла операций:

1. Сбор сигналов с датчиков;
2. Обработка сигналов согласно прикладному алгоритму управления;
3. Выдача управляющих воздействий на исполнительные устройства (механизмы).

В нормальном режиме работы контроллер непрерывно выполняет этот цикл с частотой от 50 раз в секунду. Время, затрачиваемое контроллером на выполнение полного цикла, часто называют временем (или периодом) сканирования; в большинстве современных ПЛК сканирование может настраиваться пользователем в диапазоне от 20 до 30000 миллисекунд. Для быстрых технологических процессов, где критична скорость реакции системы и требуется оперативное регулирование, время сканирования может составлять 20 мс, однако для большинства непрерывных процессов период 100 мс считается вполне приемлемым.

В отличие от персонального компьютера он рассчитан на решение

ограниченного круга задач и должен обладать следующими основными свойствами:

1) работа в режиме реального времени, т.е. обеспечение высокой реактивности (быстродействия) на запросы обслуживания со стороны объекта управления (обеспечение управления в темпе протекания технологического процесса);

2) повышенные требования к надежности функционирования:

- автоматический перезапуск в случае «зависания» программы;
- конструкция, приспособленная для работы в цеховых («полевых») условиях (повышенные вибрации, электромагнитные помехи, запыленность, перепады температуры, иногда взрывоопасность);
- минимальное потребление энергии и рассеяние тепла в условиях ограниченной мощности источника питания и отсутствия элементов принудительной вентиляции и охлаждения;

3) модульность архитектуры и возможность встраивания дополнительных блоков управляющей, регистрирующей, сопрягающей аппаратуры, что помимо специальных конструкторских решений обеспечивается использованием стандартных шин и увеличением числа плат расширения;

**Условия эксплуатации.** Использование PLC как в закрытых промышленных объектах (цех, участок, склад и т.д.), так и на открытых площадках (транспортёры, дозирующие устройства и т.д.), предполагает расширенный температурный диапазон, влияние атмосферных и механических воздействий, а также высокий уровень электромагнитных помех, возникающих от кабелей электропитания, блуждающих токов в арматуре зданий и т. д.

В соответствии с условиями эксплуатации предусматриваются варианты исполнения PLC для общепромышленных применений (IP20, IP54) и для специализированных тяжелых условий эксплуатации.

Основные эксплуатационные требования для PLC следующие

Температура окружающей среды:

- типовые условия.....от 0 до +50 °С
- специальные условия.....от —40 до +85 °С
- хранение.....от -55 до +85 °С

Относительная влажность воздуха при 40°С (без конденсации).....до 95%

Требуемая степень защиты:

- условия «чистого» производства.....IP20 – IP32
- нормальные промышленные условия.....IP54

условия работы в агрессивных средах.....IP55 – IP68  
 Вибрация от 8 до 25 Гц с ускорением до 3g  
 Обеспечение электромагнитной совместимости высокой стойкости W3 и специальной W4  
 Защита от статического электричества и воздействия атмосферных разрядов  
 Обеспечение необходимого сопротивления заземления корпуса  
 Обеспечение условий искробезопасности при работе в агрессивных средах.



Рис. Базовые функции промышленного контроллера

### 2.3.2. Аппаратная структура контроллера

Аппаратно промышленные контроллеры имеют модульную архитектуру и могут состоять из следующих компонентов:

1. Базовая панель (Baseplate). Она служит для размещения на ней других модулей системы, устанавливаемых в специально отведенные позиции (слоты). Внутри базовой панели проходят две шины: одна — для подачи питания на электронные модули, другая – для пересылки данных и информационного обмена между модулями.

Кроме того, она является несущей частью и выполняет функции защиты внутренних схем от техноклиматических условий, внешних помех, разрядки статических зарядов, а также подавления помех, излучаемых внутренними цепями. Внутренние поверхности базовой панели могут быть покрыты специальными материалами, повышающими его экранирующие свойства.

Существенными требованиями к базовой панели являются герметичность, экранирующие свойства и возможности теплоотвода. На корпусе предусматриваются средства для крепления его на стене или металлической штанге, а в нижней части корпуса – ниша для подсоединения кроссового узла и средств герметизации кабелей модуля.

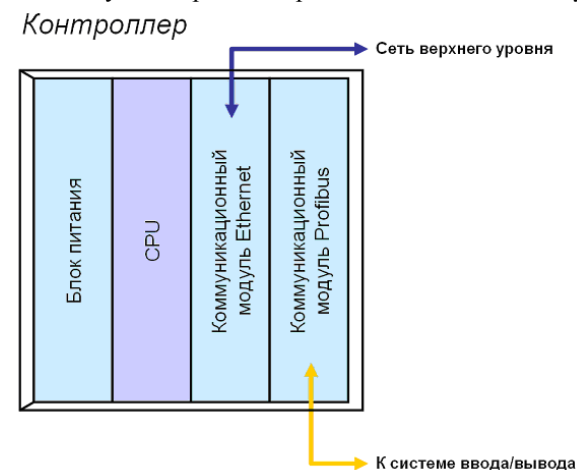


Рис.1. Промышленный контроллер с коммуникациями Profibus и Ethernet.

2. Модуль центрального вычислительного устройства (процессора) (CPU). Это мозг системы, в котором происходит математическая обработка данных. Для связи с другими устройствами CPU часто ос-

нащается сетевым интерфейсом, поддерживающим тот или иной коммуникационный стандарт.

3. Коммуникационные модули. Необходимы для добавления сетевых интерфейсов, неподдерживаемых напрямую самим CPU. Коммуникационные модули существенно расширяют возможности PLC по сетевому взаимодействию. С их помощью к контроллеру подключают узлы распределенного ввода/вывода, интеллектуальные полевые приборы и станции операторского уровня. Они реализуют дистанционную загрузку задач и оперативный обмен данными между PLC, рабочими станциями операторов (уровень SCADA-систем) и компьютеров верхних уровней (уровень MES и ERP-систем) на расстоянии от сотен метров до нескольких километров со скоростями, соответствующими требованиям реактивности системы управления.

4. Блок питания. Нужен для запитки системы от 220 V. Однако многие ПЛК не имеют стандартного блока питания и запитываются от внешнего.

5. Модули ввода данных и вывода управляющих воздействий. Иногда на базовую панель устанавливаются модули ввода/вывода полевых сигналов, которые образуют так называемый локальный ввод/вывод, однако для большинства распределенных систем управления (DCS) характерно использование именно распределенного (удаленного) ввода/вывода.

Данные модули предполагают работу с дискретными и аналоговыми сигналами от датчиков и исполнительных механизмов объекта управления. Они реализуются на отдельной плате и соединяются с процессором через разъем. Тип и количество входных и выходных сигналов определяются в зависимости от конкретного технологического процесса.

В общем случае наличие аналоговых (Analog) и дискретных (Discrete) модулей ввода (Input) и вывода (Output). предполагает следующие варианты модулей *AI* (аналоговый ввод), *AO* (аналоговый вывод), *DI* (дискретный ввод), *DO* (дискретный вывод).

Основными параметрами модулей ввода-вывода в общем случае являются скорость и погрешность преобразования, а также диапазон входных/выходных напряжений и токов.

В настоящее время в зарубежной и отечественной промышленности используется в основном номенклатура датчиков с входными и выходными параметрами, нормированными в соответствии с международными стандартами.

Минимальная типовая номенклатура модулей ввода-вывода  
Ввода-вывода дискретных сигналов:

низкого (ТТЛ) уровня;  
среднего уровня напряжения и тока (до 50 В, 100-300 мА);  
высокого (до 260 В) уровня напряжения переменного или постоянного тока;  
ввода дискретных сигналов типа «сухой контакт»

Ввода аналоговых сигналов:

среднего уровня  
по напряжению ..... ± 5...±10 В  
по току ..... 4 – 20 мА

низкого уровня  
по напряжению ..... 0 – 500 мВ  
по току ..... 0 – 4 мА

Вывода аналоговых сигналов среднего уровня:

величина сигналов  
по напряжению ..... ± 5...± 10 В  
по току ..... 4 – 20 мА

Ввода время-импульсных сигналов:

входные напряжения ..... 5 – 48 В

временной диапазон входных сигналов ..... 1 – 1000с

Ввода число-импульсных сигналов:

входные напряжения ..... 5 – 48 В

максимальная частота ..... 10 – 100 кГц

максимальное число суммируемых импульсов ..... не менее 10<sup>5</sup> – 10<sup>6</sup>

минимальная длительность ..... 5 – 50 мкс

Наиболее целесообразным вариантом структурной организации модуля ввода-вывода является разделение его на две функционально-конструктивные части. Одна часть – системная, реализующая функции сопряжения с компьютером высшего уровня (SCADA-система) и в ряде случаев функции обработки информации, и вторая – собственно модуль, осуществляющий непосредственный прием сигналов от датчиков технологического процесса и выдачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

На плате модуля могут размещаться:

- преобразователь входного постоянного напряжения питания в постоянное напряжение питания разнотипных узлов (дискретных, аналоговых и др.);
- интерфейсные преобразователи;
- функциональные узлы (например, АЦП) с гальванической развязкой;
- нормализаторы уровней сигналов, осуществляющие, например, преобразование тока в напряжение, фильтрацию и усиление аналогового сигнала, смещение начального значения диапазона входных сигналов, согласование высокоуровневых входных и выходных дискретных сигналов от объекта с сигналами контроллера и обеспечивающие непосредственное подключение датчиков, двигателей и т.д.

На плате модуля ввода-вывода могут быть также установлены специализированные процессоры, выполняющие цифровую фильтрацию и предварительную обработку информации с датчиков, эталонный источник напряжения для оценки и коррекции метрологических



характеристик АЦП и др.

Модули ввода-вывода должны содержать элементы гальванического разделения цепей связи с датчиками и исполнительными устройствами.

Сигналы к модулям ввода от датчиков (или сигналы от модулей вывода к исполнительным устройствам) передаются по проводам, которые сопрягаются с кроссовыми соединителями (переходными устройствами) – кабельными разъемами или клеммными колодками с пружинящими или выполненными «под винт» зажимами (зажимы предпочтительнее, так как позволяют подсоединять и отсоединять провода независимо друг от друга).

5. *Средства индикации.* Предназначены для вывода информации о состоянии устройства и процесса управления в целом, о прохождении тестов и типах обнаруженных ошибок, а также о состоянии каналов связи с объектом управления. Элементами индикации могут служить светодиоды или светодиодные индикаторные панели. Введение средств индикации не является обязательным.

Отличительной особенностью контроллеров, применяемых в DCS, является возможность их резервирования. Резервирование нужно для повышения отказоустойчивости системы и заключается, как правило, в дублировании аппаратных модулей системы.

#### *Резервированный контроллер*

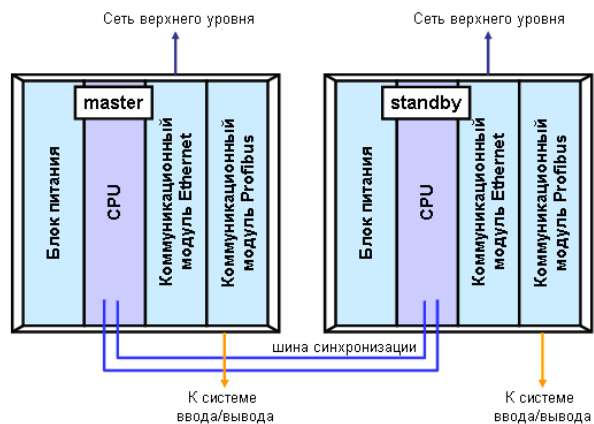


Рис. 2. Резервированный контроллер с коммуникациями Profibus и Ethernet.

Резервируемые модули работают параллельно и выполняют одни и те же функции. При этом один модуль находится в активном состоянии, а другой, являясь резервом, – в режиме «standby». В случае отказа активного модуля, система автоматически переключается на резерв (это называется «горячий резерв»). Контроллеры связаны шиной синхронизации, по которой они отслеживают состояние друг друга. Это решение позволяет разнести резервированные модули на значительное расстояние друг от друга (например, расположить их в разных шкафах или даже аппаратных).

Допустим, в данный момент активен левый контроллер, правый – находится в резерве. При этом, даже находясь в резерве, правый контроллер располагает всеми процессными данными и выполняет те же самые математические операции, что и левый. Контроллеры синхронизированы. Предположим, случается отказ левого контроллера, а именно модуля CPU. Управление автоматически передается резервному контроллеру, и теперь он становится главным. Здесь очень большое значение имеют время, которое система тратит на переключение на резерв (обычно меньше 0,5 с) и отсутствие возмущений (удара). Теперь система работает на резерве. Как только инженер заменит отказавший модуль CPU на исправный, система автоматически передаст ему управление и возвратится в исходное состояние.

При построении PCSU важно выбрать контроллер, удовлетворяющий всем техническим условиям и требованиям конкретного производства. Подбирая оптимальную конфигурацию, инженеры оперируют определенными техническими характеристиками промышленных контроллеров. Наиболее значимые перечислены ниже:

1. Возможность полного резервирования. Для задач, где отказоустойчивость критична (химия, нефтехимия, металлургия и т. д.), применение резервированных конфигураций вполне оправдано, тогда как для других менее ответственных производств резервирование зачастую оказывается избыточным решением.

2. Количество и тип поддерживаемых коммуникационных интерфейсов. Это определяет гибкость и масштабируемость системы управления в целом. Современные контроллеры способны поддерживать до 10 стандартов передачи данных одновременно, что во многом определяет их универсальность.

3. Быстродействие. Измеряется, как правило, в количестве выполняемых в секунду элементарных операций (до 200 млн.). Иногда быстродействие измеряется количеством обрабатываемых за секунду функциональных блоков. Быстродействие зависит от типа централь-

ного процессора (Intel, AMD, Motorola, Texas Instruments и т. д.)

4. Объем оперативной памяти. Во время работы контроллера в его оперативную память загружены запрограммированные пользователем алгоритмы автоматизированного управления, операционная система, библиотечные модули и т.д., т.е. чем больше оперативной памяти, тем сложнее и объемнее алгоритмы контроллер может выполнять. Варьируется от 256 килобайт до 32 мегабайт.

5. Надежность. Нарботка на отказ до 10-12 лет.

6. Наличие специализированных средств разработки и поддержка различных языков программирования. Очевидно, что существование специализированной среды разработки прикладных программ – это стандарт для современного контроллера. Для удобства программиста реализуется поддержка сразу нескольких языков как визуального, так и текстового (процедурного) программирования (FBD, SFC, IL, LAD, ST).

7. Возможность изменения алгоритмов управления на «лету» (online changes), т.е. без остановки работы контроллера. Для большинства контроллеров, применяемых в РСУ, поддержка online changes жизненно необходима, так как позволяет тонко настраивать систему или расширять ее функциональность прямо на работающем производстве.

8. Возможность локального ввода/вывода. Некоторые PLC рассчитаны на работу только с удаленной подсистемой ввода/вывода, другие могут работать как с локальными модулями ввода/вывода (свободные слоты на базовой панели), так и удаленными узлами.

9. Вес, габаритные размеры, вид монтажа (на DIN-рейку, на монтажную панель или в стойку 19»). Важно учитывать при проектировании и сборке системных шкафов.

10. Условия эксплуатации (температура, влажность, механические нагрузки). Большинство промышленных контроллеров могут работать в жестких промышленных условиях от 0 до 65°C и при влажности до 95-98%.

### 2.3.3. Программное обеспечение PLC

#### 2.3.3.1. Основные требования и компоненты

Основные требования к программному обеспечению для PLC:

- автономность;
- поддержка процессов сбора, анализа информации и управления, а также локальных баз данных в реальном времени;
- возможность дистанционного управления со стороны диспетчерского пункта (уровень SCADA-систем);
- сетевая поддержка.

Программное обеспечение включает следующие основные компоненты:

- тестовое программное обеспечение;
- базовое программное обеспечение;
- прикладное технологическое программное обеспечение.

*Тестовое программное обеспечение.* Выполняет тестирование (отладку) отдельных PLC и системы в целом (включая тестирование и диагностику различных конфигураций) и содержит следующие компоненты:

- программы инициализации и конфигурирования, а также начальные тесты для PLC и сетевых адаптеров (внутреннее программное обеспечение, расположенное в ПЗУ);
- программы для тестирования PLC через линию связи с компьютером высшего уровня или специализированной наладочной аппаратурой;
- программы для тестирования, наладки и сбора статистики локальной сети распределенной системы;
- комплексное тестирование распределенной системы в целом;
- специализированное тестовое программное обеспечение для наладочных пультов, панелей, стендов, эмуляторов и т.д.

Отладка PLC выполняется с помощью компьютеров или специальных пультов, обеспечивающих доступ к памяти и портам PLC с целью отладки и оперативного ввода данных, уставок, управляющей информации. Отладчик позволяет перевести работу PLC в режим пошагового исполнения внутренних программ, эмулировать подачу внешних сигналов, отслеживать изменения состояний регистров и т. п.

*Базовое программное обеспечение.* В его состав входят:

- операционные системы реального времени, управляющие выполнением прикладной технологической программы и устройствами PLC;
- сетевые программные средства, обеспечивающие информационный обмен между отдельными узлами и возможность дистанционного доступа и управления в распределенной системе.

Для разработки *технологических программ* используются следующие средства: редакторы, системы программирования (поддержка ассемблеров и языков высокого уровня, а также языков технологического программирования), средства отладки и тестирования, а также инструментарий для функционально-ориентированных языков программирования, позволяющих с минимальными трудозатратами осуществлять проектирование системы «под ключ».

Технологические языки, используемые для разработки прикладных программ, включают в себя обычно арифметические и логические операции, средства организации циклов подключения и отключения портов, средства управления прерываниями (запрет/разрешение, установка приоритетов), средства работы с интервалами времени и обработки событий, а также средства для динамической загрузки и запуска программ. Элементами языка являются имена портов ввода-вывода и отдельных их разрядов, имена счетчиков, таймеров и контактов, флаги, а также параметры технологического процесса.

Современные средства автоматизации проектирования технологических программ позволяют программировать PLC с использованием библиотеки стандартных программных модулей – «алгоблоков», реализующих типовые алгоритмы управления АСУТП: компараторы, формирователи ШИМ-сигналов (широтно-импульсных) и др.

### 2.3.3.2. Языки программирования

Главная задача PLC – это выполнение прикладной программы управления технологическим процессом. Поэтому контроллер свободно программируем, т.е. предоставляет возможность создавать пользовательские программы произвольной структуры без ограничений их функциональности.

Что нужно, чтобы запрограммировать ПЛК? Грамотный специалист. Во-вторых, персональный компьютер или портативный программатор, подключенный к контроллеру по сети. В-третьих, программный пакет разработки, поставляемый, как правило, за дополнительную плату.

Средства разработки программ предлагают множество возможностей:

1. Наличие подготовленных компонентов (программные библиотеки, функциональные блоки, готовые процедуры и шаблоны), что ускоряет процесс разработки программного обеспечения;

2. Инструменты для отладки, тестирования и симуляции (позволяют выполнять программу PLC на компьютере без загрузки в реальный контроллер прикладной программы);

Современные средства разработки прикладного программного обеспечения для промышленных контроллеров, как правило, поддерживают до шести разных языков программирования.

Существует международный стандарт IEC 61131, разработанный Международной Электротехнической Комиссией (МЭК, IEC) и состоящий из восьми частей. В его третьей части, IEC 61131-3, описываются языки программирования ПЛК. Первоначальной целью стандарта IEC 61131-3 была унификация языков программирования ПЛК и предоставление разработчикам ряда аппаратно-независимых языков, что, по замыслу создателей стандарта, обеспечило бы простую переносимость программ между различными аппаратными платформами и снимало бы необходимость изучения новых языков и средств программирования при переходе разработчика на новый ПЛК.

К сожалению, цели в полном объеме достигнуты не были. Каждый производитель ПЛК сопровождает свой продукт собственной средой программирования, которая, как правило, не совместима с другими, да и о взаимной платформенности программного кода можно забыть. Тем не менее, в части описания языков программирования стандарт IEC 61131 остается чрезвычайно актуальным и является ориентиром для большинства разработчиков ПЛК.

Языки программирования стандарта МЭК 6-1131/3 включают в себя четыре визуальных языка (LD, FBD, SFC, CFC), ориентированных на инженеров и бизнес-аналитиков и два текстовых (ST, IL), ориентированных на программистов. С их помощью одинаково программируются и контроллеры, и алгоритмы человеко-машинного интерфейса (SCADA-системы) и задачи MES-систем.

Ниже приведен обзор основных языков стандарта для программирования промышленных контроллеров.

**Язык LD.** Язык LD (LAD, Ladder Diagram) является графическим языком разработки, программа на котором представляет собой аналог релейной схемы. Пример программы на данном языке приведен на рис. 1.

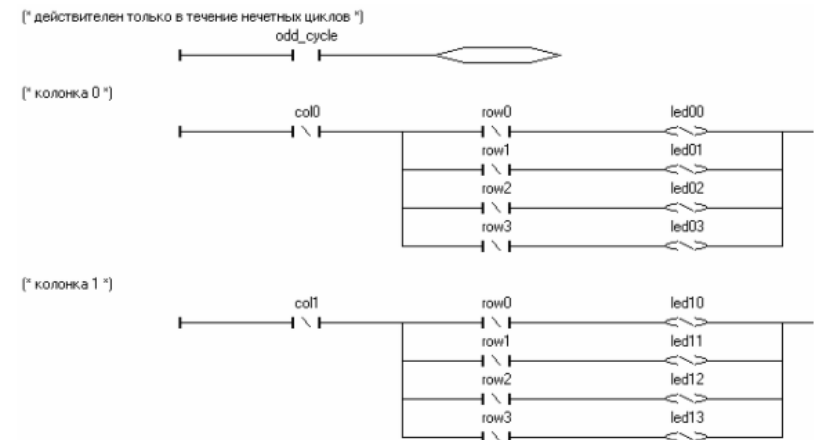


Рис. 1. Язык релейных диаграмм LD

К недостаткам данного языка можно отнести то, что по мере увеличения количества «реле» в схеме она становится сложнее для анализа и отладки. Еще один недостаток языка LD: язык, построенный по аналогии с релейными схемами, может быть эффективно использован только для описания процессов, имеющих дискретный (двоичный) характер; для обработки «непрерывных» процессов (с множеством аналоговых переменных) такой подход теряет смысл.

**Язык FBD.** Язык FBD (Functional Block Diagram, Диаграмма Функциональных Блоков) представляет собой совокупность функциональных блоков (functional blocks, FBs), входы и выходы которых со-

единены линиями связи (connections). Эти связи являются по сути дела переменными программы и служат для пересылки данных между блоками. Каждый блок представляет собой математическую операцию (сложение, умножение, триггер, логическое «или» и т.д.) и может иметь, в общем случае, произвольное количество входов и выходов. Начальные значения переменных задаются с помощью специальных блоков – входов или констант, выходные цепи могут быть связаны либо с физическими выходами контроллера, либо с глобальными переменными программы. Пример фрагмента программы на языке FBD приведен на рис. 2.

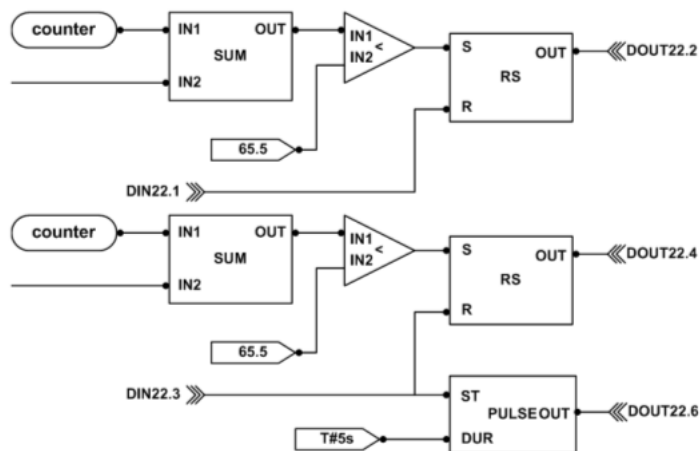


Рис. 2. Язык функциональных схем FBD

Практика показывает, что FBD является наиболее распространенным языком стандарта IEC. Графическая форма представления алгоритма, простота в использовании, повторное использование функциональных диаграмм и библиотеки функциональных блоков делают язык FBD незаменимым при разработке программного обеспечения ПЛК. Вместе с тем, нельзя не заметить и некоторые недостатки FBD. Хотя FBD обеспечивает легкое представление функций обработки как «непрерывных» сигналов, в частности, функций регулирования, так и логических функций, в нем неудобным и неочевидным образом реализуются те участки программы, которые было бы удобно представить в виде конечного автомата.

**Язык SFC.** Язык последовательных функциональных схем SFC

(Sequential Function Chart) – программа описывается в виде схематической последовательности шагов, объединенных переходами. Язык SFC построен по принципу, близкому к концепции конечного автомата, что делает его одним из самых мощных языков программирования стандарта IEC 61131-3. Пример программы на языке SFC приведен на рис. 3.

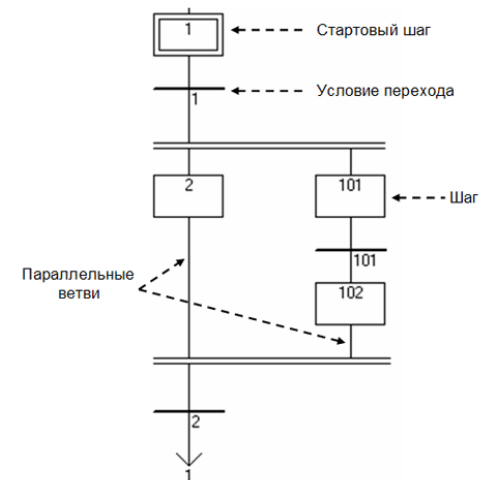


Рис. 3. Язык последовательных функциональных схем SFC

Наиболее простым и естественным образом на языке SFC описываются технологические процессы, состоящие из последовательно выполняемых шагов, с возможностью описания нескольких параллельно выполняющихся процессов, для чего в языке имеются специальные символы разветвления и слияния потоков (дивергенции и конвергенции)

Шаги последовательности располагаются вертикально сверху вниз. На каждом шаге выполняется определенный перечень действий (операций), а для описания самой операции используются языки программирования, такие как ST или IL.

Действия (операции) в шагах имеют специальные классификаторы, определяющие способ их выполнения внутри шага: циклическое выполнение, однократное выполнение, однократное выполнение при входе в шаг и т. д. В сумме таких классификаторов насчитывается де-

вать, причем среди них есть, например, классификаторы так называемых сохраняемых и отложенных действий, заставляющие действие выполняться даже после выхода программы из шага.

Неудобство языка SFC связано с тем, что шаги графически располагаются сверху вниз, и переход, идущий в обратном направлении, изображается в неявной форме, в виде стрелки с номером состояния, в которое осуществляется переход.

**Язык IL.** Язык IL (Instruction List, Список Команд) представляет собой ассемблероподобный язык. Ввиду своей ненаглядности он практически не используется для программирования комплексных алгоритмов автоматизированного управления, но часто применяется для кодирования отдельных функциональных блоков, из которых впоследствии складываются схемы FBD или SFC. При этом IL позволяет достичь высокой оптимальности кода: программные блоки, написанные на IL, имеют высокую скорость исполнения и наименее требовательны к ресурсам контроллера.

Язык IL имеет все недостатки, которые присущи другим низкоуровневым языкам программирования: сложность и высокую трудоемкость программирования, трудность модификации написанных на нем программ, малую степень «видимого» соответствия исходного текста программы и решаемой задачи.

Пример программы на языке IL приведен на рис. 5.

```

ld true
st blinker.run
ld t#1s
st blinker.cycle
cal blinker

ld blinker.q
st trigger.clk
cal trigger

ld trigger.q
jmpnc Lbmodulo
ld counter
add 1
st counter

Lbmodulo:
ld counter
lt 4
lbout
ld 0
st counter

Lbout:
ld counter
eq 0
st i10
ld counter
eq 1
st i11
ld counter
eq 2
st i12
ld counter
eq 3
st i13

ret

```

Рис. 5. Язык инструкций IL.

**Язык ST.** Язык ST (Structured Text, Структурированный Текст) представляет собой язык высокого уровня, имеющий черты языков Pascal и Basic. Данный язык имеет те же недостатки, что и IL, однако они выражены в меньшей степени. Пример программы на языке ST приведен на рис. 4.

С помощью ST реализовываются арифметические и логические операции (в том числе, побитовые), безусловные и условные переходы, циклические вычисления; возможно использование как библиотечных, так и пользовательских функций.

Язык ST может быть освоен технологом за короткий срок, однако текстовая форма представления программ служит сдерживающим фактором при разработке сложных систем, так как не дает наглядного представления ни о структуре программы, ни о происходящих в ней процессах.

```

blinker (TRUE, t#1s);
trigger (blinker.q);

if trigger.q then
  counter := counter + 1;
  if counter >= 4 then
    counter := 0;
  end_if;
end_if;

st0 := (counter = 0);
st1 := (counter = 1);
st2 := (counter = 2);
st3 := (counter = 3);

```

Рис. 4. Язык структурированного текста ST.

**Язык CFC.** (Continuous Flow Chart) – это дальнейшее развития языка FBD, специально созданный для проектирования систем управления непрерывными технологическими процессами.

Проектирование сводится к выбору из библиотек готовых функциональных блоков, их позиционированию на экране, установке соединений между их входами и выходами, а также настройке параметров выбранных блоков. В отличие от FBD, функциональные блоки языка CFC выполняют не только простые математические операции, а ориентированы на управление целыми технологическими единицами. Так в типовой библиотеке CFC блоков находятся комплексные функциональные блоки, реализующие управление клапанами, моторами, насосами; блоки, генерирующие аварийные сигнализации; блоки PID-регулирования и т.д.

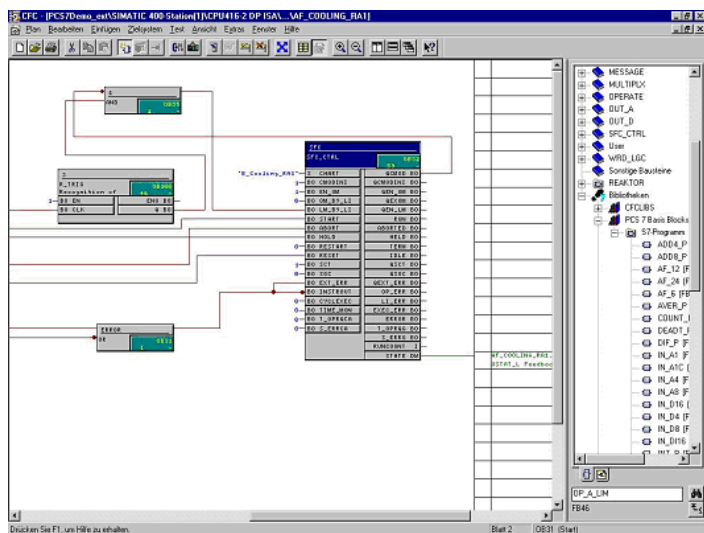


Рис. 6. Среда проектирования на языке CFC системы Simatic PCS7

CFC прост в освоении, и при этом позволяет разрабатывать сложнейшие алгоритмы автоматизированного управления без каких-либо специфических знаний других языков программирования.

## 2.4. Средства и устройства вывода

### 2.4.1. Исполнительные механизмы

Назначение и базовые элементы

Основные характеристики и классификация

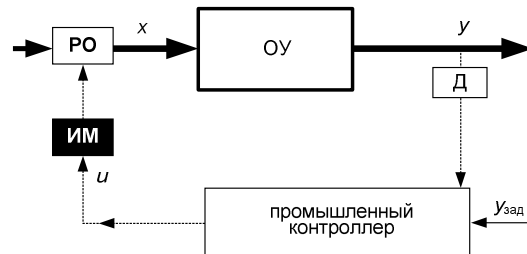


Рис. 1. Расположение исполнительных механизмов в структурной схеме локальной САУ

**Назначение и базовые элементы.** Исполнительный механизм (ИМ) – устройство, предназначенное для преобразования сигналов управления, сформированных PLC (см. 2.3), в сигналы, удобные для воздействия на конечное звено САУ – регулирующий орган (РО) (см. 2.4.2).

На практике исполнительными механизмами являются двигатели технологического оборудования (насосов, вентиляторов, задвижек, заслонок и клапанов, пневмоцилиндры и т. д.).

Исполнительный механизм состоит из следующих базовых элементов (рис. 2):

- исполнительный двигатель (электродвигатель, поршень, мембрана);
- элемент сцепления (муфта, шарнир);
- передаточно-преобразующий элемент (редуктор с выходным рычагом или штоком);
- усилитель мощности (электрические, пневматические, гидравлические, комбинированные)

В конкретной модели ИМ ряд элементов (кроме исполнительного двигателя) может отсутствовать.

Основное требование к ИМ: перемещения РО с возможно меньшим искажением законов регулирования формируемых PLC, т.е. ИМ должен обладать достаточным быстродействием и точностью.

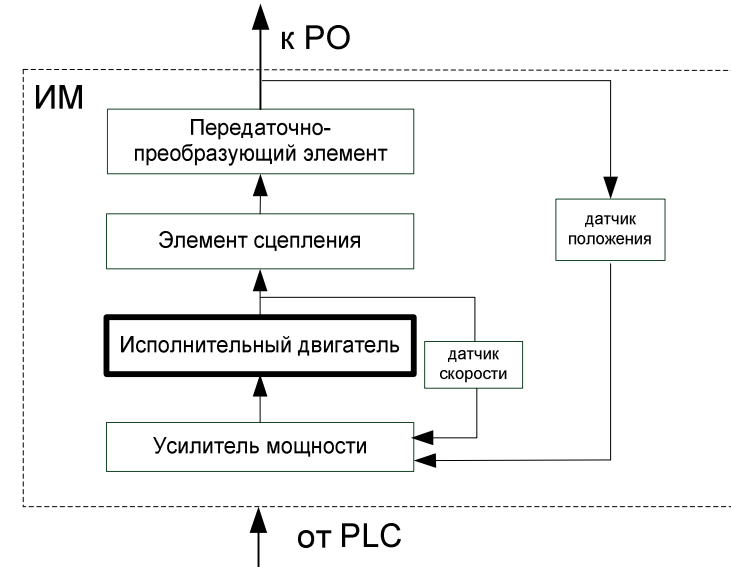


Рис. 2. Базовые элементы ИМ

### Основные характеристики и классификация.

Основные характеристики:

- а) номинальное и максимальное значение вращающего момента на выходном валу (поворотные) или усилия на выходном штоке;
- б) время оборота выходного вала ИМ или хода его штока;
- в) максимальная величина угла поворота выходного вала или хода штока;
- г) зона нечувствительности.

ИМ различных ветвей имеют существенно отличительные механические (внешние) характеристики, т.е. зависимость частоты вращения  $n$  от момента  $M$ :  $n=f(M)$  или скорости перемещения  $v$  от толкающего (тягового) усилия  $P$ :  $v=f(P)$

Исполнительные механизмы классифицируют по следующим признакам:



- 1) перемещение регулирующего органа (поворотные и прямые);
- 2) конструктивное исполнение (электрические, гидравлические пневматические);

Электрические – с приводами электрического двигателя и электромагнита;

Гидравлические – с приводами: поршневыми, плунжерными, от гидродвигателя;

Пневматические – с приводами: поршневыми, плунжерными, мембранным, диафрагменным, от пневмодвигателя.

На рис. 3 представлены механические характеристики электрических, гидравлических и пневматических ИМ. Из него видно, что электрические и гидравлические ИМ в рабочем диапазоне имеют довольно жесткую механическую характеристику и могут надежно работать при перегрузках.

Электрические ИМ	Гидравлические ИМ		Пневматические ИМ		
	с асинхронным двигателем переменного тока.	приводы поступательного движения	приводы вращательного движения	приводы поступательного движения	приводы вращательного движения

Рис. 3. Механические характеристики исполнительных механизмов

На практике наибольшее распространение получили электрические ИМ из-за неограниченного радиуса действия и возможности применения при низких температурах окружающей среды.

Электрические ИМ классифицируются (рис.4):



Рис. 4. Классификация электрических ИМ

### 1. Электромагнитные ИМ:

– ИМ с приводами от электромагнитных муфт предназначены для передачи вращательного движения (муфты фрикционные и скольжения(рис. 5))

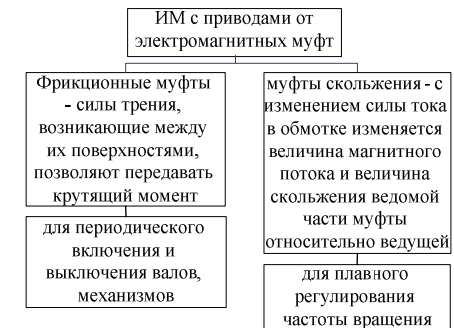


Рис. 5. Классификация электрических ИМ с приводами от электромагнитных муфт

Муфта скольжения состоит из двух половин – ведущей (якоря) 1, ведомой (индуктора) 2 с обмоткой 3. Первая приводится в действие от асинхронного электродвигателя, вторая соединена с валом рабочей машины (рис. 6).

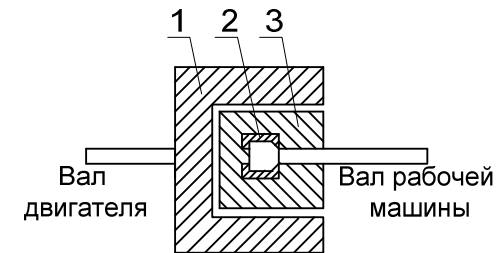


Рис.6. Общий вид муфты скольжения

С изменением силы тока в обмотке изменяются величина магнитного потока и величина скольжения ведомой части муфты 2 относительно ведущей 1. При этом плавно изменяется частота вращения вала муфты.

– ИМ с соленоидным приводом являются 2-х позиционными устройствами (т. е. предназначены для 2-х позиционного регулирования) осуществляющими поступательное движение приводных органов по

дискретному принципу: «включено – выключено». Делятся: короткоходовые МП (2-5мм) и длинноходовые КПМ (50-150 мм)

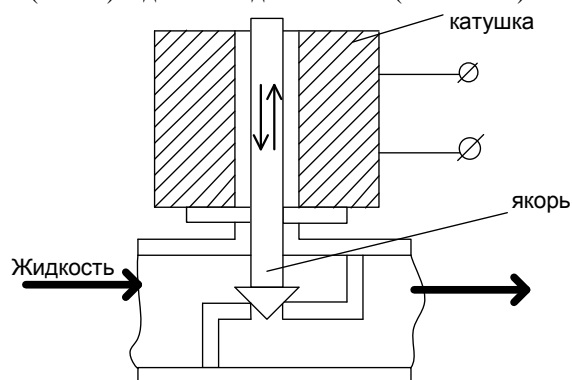


Рис.7. Принципиальная схема электромагнита

Электромагнит состоит из катушки и поступательного перемещающегося якоря (рис.7). Для питания электромагнитов используют как постоянный, так и переменный ток.

## 2. Электродвигательные ИМ:

а) однооборотные – угол поворота выходного вала не превышает  $360^0$ . Пример: МЭО (механизм электрический однооборотный), МЭ-ОК, МЭОБ. В них используются однофазные и трехфазные (МЭОК, МЭОБ) асинхронные двигатели.

б) многооборотные – для дистанционного и местного управления трубопроводной арматурой (вентили).

ИМ с электродвигателями постоянного тока	однооборотные	с углом поворота выходного вала $120-270^0$ для РО, РО: заслонки, упоры, краны, шиберы
	многооборотные	У постоянно вращающихся ИМ крутящий момент от вала электродвигателя передается к РО через редукторы, электромагнитные муфты и другие преобразователи. РО: запорные вентили, дроссели, задвижки, шнеки, лопастные и скребковые питатели
ИМ с электродвигателями переменного тока	однооборотные	применяются трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором.
	многооборотные	применяются асинхронные трехфазные двигатели

### 2.4.2. Регулирующие органы

Назначение и классификация  
Основные характеристики

**Назначение и классификация.** Регулирующий орган (РО) – конечный элемент САУ (рис. 1), осуществляющий непосредственное управляющее воздействие на ОУ. РО изменяет поток материала, энергии, взаимное расположение частей аппаратов, станков или механизмов в направлении нормального протекания хода технологического процесса.

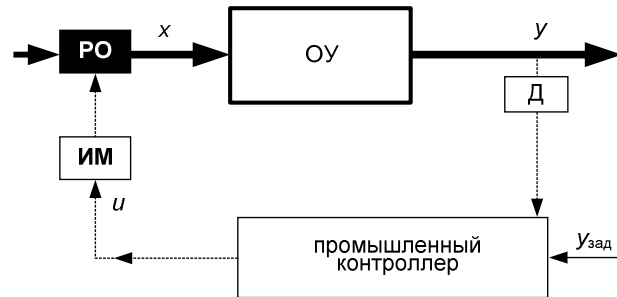


Рис. 1. Расположение регулирующих органов в структурной схеме локальной САУ

В зависимости от регулируемого материального (энергетического потока) РО классифицируются (рис. 2):

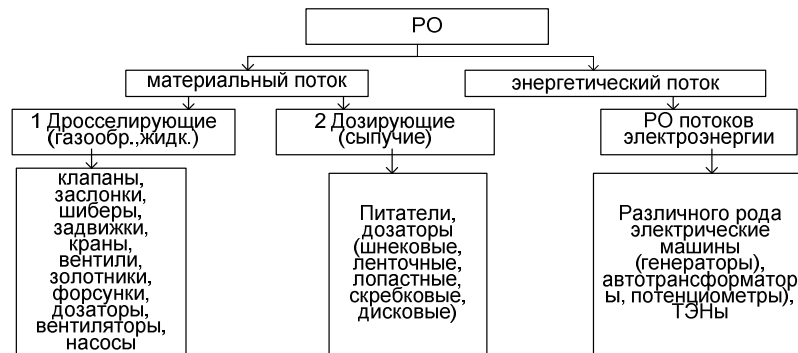


Рис. 2. Классификация РО

1. Типовые дросселирующие устройства, т.е. устройства с переменным гидравлическим сопротивлением – для жидких и газообразных сред представлены на рис. 3.

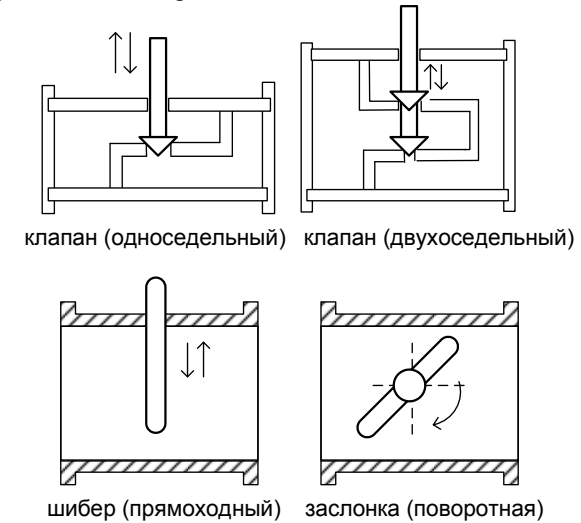


Рис. 3. Типовые дросселирующие устройства для жидких и газообразных сред

2. Типовые дозирующие устройства для сыпучих материалов представлены на рис. 4:

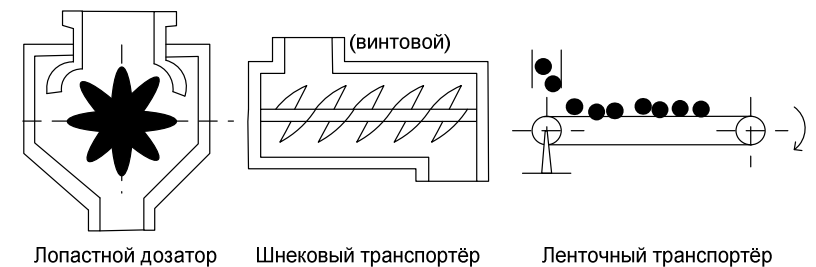
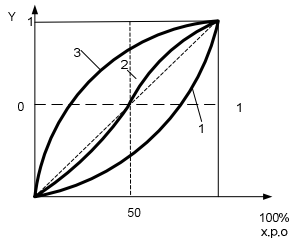


Рис. 4. Типовые дозирующие устройства для сыпучих материалов

**Основные характеристики.** Основной характеристикой РО является его статическая характеристика, т.е. зависимость между выходным параметром  $Y$  (расход, давление, напряжение) и величиной хода регулирующего органа ( $x$ , р.о.) в процентах.

Типовые статические характеристики РО имеют вид (рис. 5):



**Рис. 5.** Статические характеристики: S-образная кривая (2) наиболее характерна для большинства РО

Динамические характеристики РО (инерционность, запаздывание), обычно намного меньше чем у ОУ и специально не рассматриваются.

РО обеспечивают:

а) двухпозиционное регулирование – затвор РО быстро перемещается из одного крайнего положения в другое.

б) непрерывное – этом случае необходимо, чтобы пропускная характеристика РО была строго определенной (шибер, кран, поворотная заслонка).

*Пропускная способность* (! важный параметр) – расход жидкости  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , пропускаемой регулирующим органом при перепаде давления на нем  $0,1 \text{ мм/см}^2$ . Измеряется  $[\text{м}^3/\text{час}]$

*Пропускная характеристика* – зависимость пропускной способности от перемещения затвора  $S$ :  $k_v = f(S)$  при постоянном перепаде давления. В справочниках значения  $k_v$  приводятся для полностью открытых РО.

*Расходная характеристика* – зависимость относительного расхода среды  $\mu$  от  $S$  т.е.  $\mu = f(S)$ , где  $\mu = Q_1/Q_{\text{max}}$ ;

$Q_1$  – расход среды при некотором открытии регулирующего органа;

$Q_{\text{max}}$  – расход среды при полностью открытом РО.

Расходная характеристика является рабочей. РО исполняют с характеристиками:

1) линейной  $Q = A_1 \mu$ ; 2) логарифмической  $Q = A_2 \cdot \lg \beta \cdot \mu$ ;

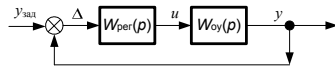
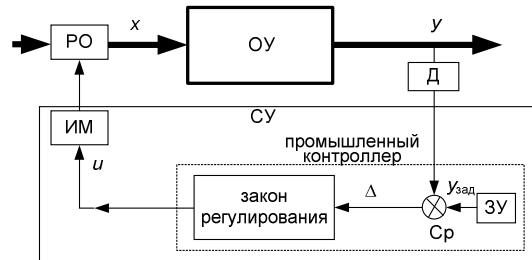
3) параболическая  $Q = A_3 \cdot \mu^2$

( $A_1, A_2, A_3$  – коэффициенты).

### 3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕ-ПРЕРЫВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

#### 3.1. Классификация автоматических регуляторов

Автоматический регулятор изменяет отклонение (сигнал рассогласования)  $\Delta$  регулируемой переменной  $y$  от заданного значения  $y_{зад}$  по определённому закону регулирования и воздействует на регулирующий орган для уменьшения этого отклонения.



Автоматические регуляторы классифицируют:

- а) по назначению: регуляторы расхода, температуры и т.д.;
- б) по зависимости от источника энергии:

1) прямого – перемещение (регулирующий орган отсутствует). Управление происходит за счёт энергии самого измерительного устройства (датчика). Просты и используются в простейших системах: состоит из чувствительного элемента и исполнительного механизма (уровень, температура, давление);

2) непрямого – перемещение регулирующего органа за счёт вспомогательной энергии (в сложных динамических системах);

в) по виду используемой энергии: электрические, пневматические, гидравлические, комбинированные;

г) по конструктивному оформлению:

1) приборные – все основные элементы смонтированы в одном корпусе;

2) агрегатные – состоят из отдельных унифицированных блоков, каждый из которых имеет определённое назначение (позволяет строить схемы любой сложности).

Основные элементы регулятора рассмотрены в 1.1.1.3.

#### 3.2. Законы регулирования

В зависимости от характера сигнала рассогласования  $\Delta$ , регулятор обрабатывает тот или иной вид выходного регулирующего сигнала  $u$ , используемого для регулирующего воздействия на ОУ. Характер этого воздействия называют *законом регулирования*.

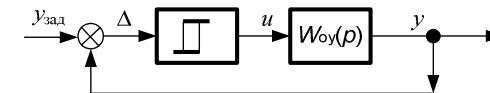
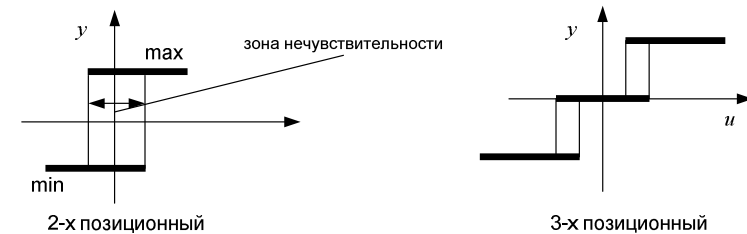
По характеру воздействия на регулирующие органы различают регуляторы:

- 1) дискретного;
- 2) непрерывного действия.

1) Регуляторы дискретного действия: релейные и импульсные.

Релейный закон регулирования (двухпозиционный) – самый простой. В них регулирующий орган перемещается через определенные промежутки времени и изменяет свое положение («открыто»–«закрыто»; «min» – «max»), т.е. позиционными.

Применение: при малом  $\tau$  и большой  $T$  объекта управления.

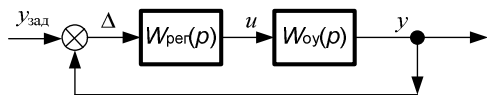


Импульсный регулятор: содержит импульсный элемент, преобразующий непрерывное изменение регулируемой переменной в ряд импульсов, следующих друг за другом через определенные промежутки времени.

Применение: для процессов с большим  $\tau$  и  $T$  (т.е. инерционными).

2) Регуляторы непрерывного действия в зависимости от регули-

руемого закона управления подразделяются: П – пропорциональные, И – интегральные, ПИ – пропорционально-интегральные; ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальные.



**П-регулятор (статический регулятор):** положение регулирующего органа пропорционально величине отклонения  $\Delta$  регулируемой переменной  $y$  от заданного значения  $y_{зад}$ .

$$u = -k_p \cdot \Delta$$

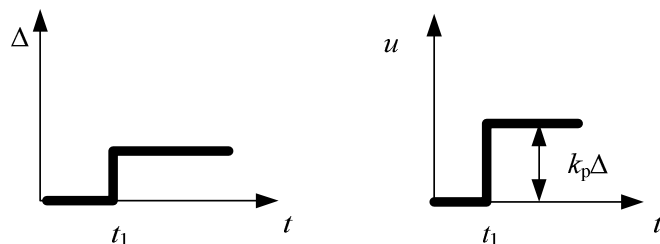
$k_p$  – коэффициент передачи регулятора (параметр настройки регулятора), т.е. сигнал отклонения  $\Delta$  приводит к изменению  $u$  в обратном направлении.

Передаточная функция П-регулятора

$$W_n(p) = -k_p$$

**Достоинства:** быстродействие (т.е. малое время переходного процесса), высокая устойчивость процесса регулирования.

**Недостатки:** основной – наличие остаточного отклонения регулируемой переменной (т.е. его невысокая точность).



**И-регулятор (астати́ческий):** скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна величине отклонения регулируемой переменной от заданного значения

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{T_u} \Delta$$

где  $T_u$  – (параметр настройки регулятора) постоянная времени интегрирования (время изодрома): время за которое регулирующий орган перемещается из одного крайнего положения в другое при максимальных отклонения регулируемой переменной от заданного значе-

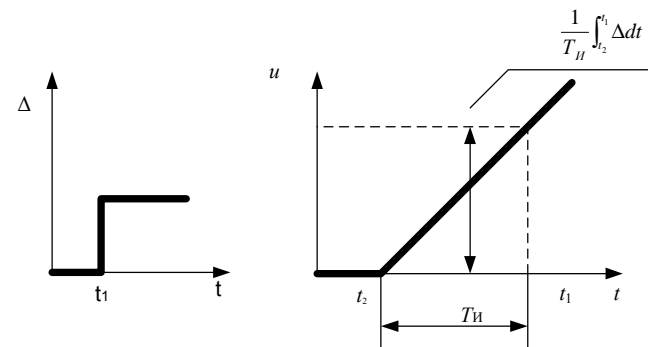
ния.

$$u = -\frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta dt$$

$$W(p) = -\frac{1}{T_u \cdot p}$$

**Достоинства:** точен, но процесс регулирования медленен.

Используется для ОУ с большими  $T$ , малыми  $\tau$  и небольшими отклонениями.



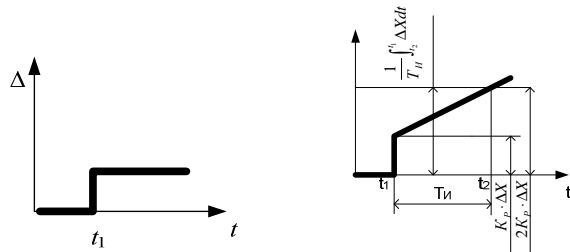
**ПИ-регулятор (изодромный):** при отклонениях регулируемой переменной от заданного значения РО вначале перемещается пропорционально отклонению (как П-регулятор), а затем при приближении регулируемой переменной к заданному значению медленно доводит её до этого значения (как И-регулятор).

**Достоинства:** точность (И-регулятор) и быстродействие (П-регулятор).

$$u = -k_p \left[ \Delta + \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta dt \right]$$

$k_p$  – коэффициент передачи регулятора,  $T_u$  – время изодрома (оба параметра – настройки регулятора).

Передаточная функция 
$$W(p) = -k_p \left( 1 + \frac{1}{T_u \cdot p} \right)$$

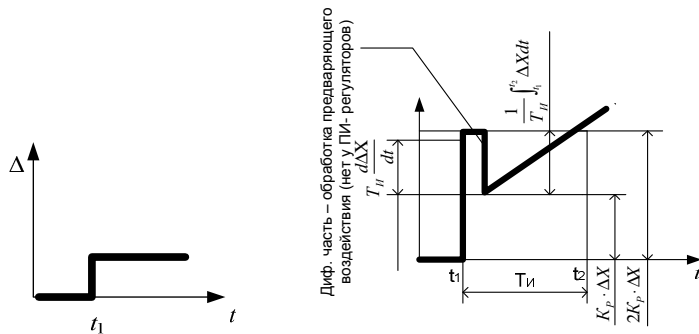


ПИД-регулятор: регулирующий орган перемещается пропорционально отклонению ( $\Delta$ ), интегралу отклонения ( $\int \Delta dt$ ) и скорости отклонения ( $\frac{d\Delta}{dt}$ ) регулируемого параметра

$$u = -k_p \left[ \Delta + \frac{1}{T_{II}} \int_0^t (\Delta) dt + T_{II} \frac{d(\Delta)}{dt} \right]$$

$T_{II}$  – время предварения;  $k_p$ ,  $T_{II}$ ,  $T_{II}$  – параметры настройки регулятора.

$$W(p) = -k_p \frac{T_u T_n p^2 + T_u p + 1}{T_u p}$$



Наиболее сложны (по устройству).

Применяется для ОУ: большие  $\tau$ , требования к отсутствию статической ошибки.

### 3.3. Временная характеристика регуляторов непрерывного типа

Важнейшей характеристикой регулятора является его временная реакция на управляющее воздействие  $u$  при внезапном рассогласовании  $\Delta$ . С учетом этой временной характеристики регуляторы непрерывного действия можно разделить на три основных типа: П-регуляторы, И-регуляторы, Д-регуляторы.

#### Пропорциональные регуляторы

Пропорциональный (П)-регулятор немедленно реагирует на внезапное отклонение регулируемой величины  $\Delta$  пропорциональным изменением управляющего воздействия  $u$  (рис. 1а).

Отношение изменения управляющего воздействия  $u$  к отклонению регулируемой величины  $\Delta$  называется пропорциональным коэффициентом  $k_p$ :  $k_p = u/\Delta$ . Он показывает, во сколько раз увеличилось или уменьшилось рассогласование. Пропорциональный коэффициент  $k_p$  имеет обычно значения в диапазоне от 0,1 до 20.

При описании П-регулятора указывается также зона пропорциональности  $X_p$ . Эта величина, обратная коэффициенту пропорциональности ( $X_p = 1/k_p$ ), показывает, насколько должна измениться регулируемая величина для изменения управляющего воздействия  $u$  на весь диапазон регулирования. Зона пропорциональности при этом указывается в процентах (от 5 % до 1000 %).

При выполнении регулировки с помощью П-регулятора новое значение управляющего воздействия  $u$ , приводит к новому действительному значению регулируемой величины, также имеющему отклонение от заданного значения. С П-регуляторами не удастся выполнить точную настройку на заданное значение: здесь всегда будет отмечаться некое остаточное рассогласование.

#### Интегральные регуляторы

Интегральный (И)-регулятор реагирует на скачкообразное отклонение регулируемой величины  $\Delta$  постоянно возрастающим управляющим воздействием  $u$  (рис. 1б).

При этом управляющее воздействие изменяется до тех пор, пока рассогласование полностью не исчезнет. И-регуляторы производят настройку на заданное значение без какого бы то ни было остаточного отклонения.

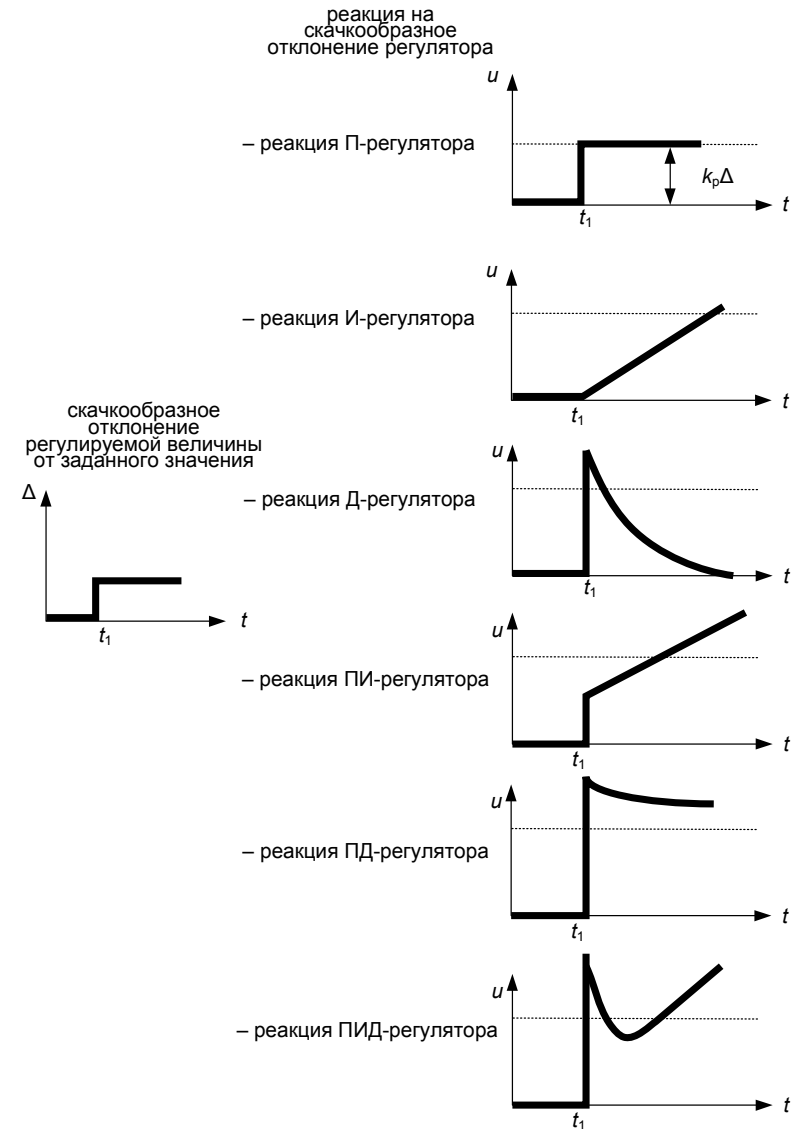


Рис. 1. Временные характеристики регуляторов (реакции на скачки)



В чистом виде интегральные регуляторы используются в химической промышленности довольно редко — с учетом их чрезмерной инерционности и склонности к нерегулируемым колебаниям. Так что в этой сфере предпочтение отдается ПИ- или ПИД-регуляторам.

#### *Дифференциальные регуляторы*

Дифференциальный (Д)-регулятор не оказывает собственно регулирующего воздействия. Он действует по принципу упреждающей реакции на отклонение регулируемой величины  $\Delta$ . Управляющее воздействие у скачкообразно возрастает и медленно возвращается к своей первоначальной реакции (рис. 1в).

В сочетании с другими основными типами регуляторов Д-регулятор ускоряет их регулирующее воздействие.

В промышленных условиях из основных типов регуляторов находит применение только П-регулятор с обратной связью либо без таковой. В остальном же используют регуляторы с комбинированной регулировочной характеристикой.

#### *Пропорционально-интегральные регуляторы*

ПИ-регуляторы реагируют сначала немедленным изменением управляющего воздействия  $u_p$  (П-составляющая), а затем постоянным нарастанием управляющего воздействия  $u_i$  (И-составляющая) — вплоть до достижения заданного значения регулируемой величины. (рис. 1г). ПИ-регуляторы весьма широко применяются в химической промышленности.

Характеристическим параметром ПИ-регулятора является время изодрома  $T_n$ . Оно обозначает период, в течение которого ПИ-регулятор еще раз изменяет управляющее воздействие на ту же величину ( $u_p = u_i$ ), на которую оно было сразу же увеличено посредством П-составляющей.

#### *Пропорционально-дифференциальные регуляторы*

ПД-регуляторы согласно своей Д-составляющей немедленно реагируют на рассогласование значительным изменением управляющего воздействия, которое затем возвращается к постоянной величине (П-составляющая) (рис. 1д). ПД-регулятор не способен производить настройку на заданное значение. В связи с этим он почти не используется в химической промышленности.

Характеристическим параметром ПД-регулятора является время предварения  $T_n$ . Это период, в течение которого чистый П-регулятор

должен был бы реагировать раньше, чтобы изменить управляющее воздействие таким же образом, что и ПД-регулятор.

#### *Пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы*

ПИД-регуляторы сочетают в себе свойства трех основных типов регуляторов (рис. 1е): немедленное и значительное изменение управляющего воздействия при отклонении регулируемой величины от заданного значения (Д-воздействие), быстрая обратная связь с возвращением к изменению управляющего воздействия соразмерно рассогласованию (П-составляющая) и последующая тонкая настройка на заданное значение без остаточного отклонения (И-составляющая).

По истечении установленного времени (времени Д-предварения) ПИД-регулятор обладает характеристикой ПИ-регулятора. Для эффективной регулировки температуры ПИД-регулятор признан самым подходящим из всех прочих типов. Для наглядности можно сравнить регулировочную характеристику ПИД-регулятора с поведением опытного автомобилиста в случае внезапного появления препятствия на его пути. Сначала он реагирует резким и стремительным изменением направления, поле чего быстро «рулит» в противоположную сторону, приводя в конечном итоге (после заключительной корректировки) свой автомобиль в нужное положение.

### 3.4. Сравнительная характеристика типов регуляторов и области их применения

Каждый тип регуляторов обладает совершенно определенными свойствами, в соответствии с которыми и определяются их области применения (таблица 1).

Какой тип регулятора более всего подходит для решения конкретной задачи регулирования, зависит от множества факторов. Важнейшим из них является совместимость либо несовместимость объекта регулирования и самого регулятора, что дает разные характеристики регулирующего контура.

Для эффективного и тонкого регулирования более всего подходит, конечно, ПИД-регулятор. Но в некоторых случаях, когда требуется наличие Д-составляющей (например при регулировке давления и расхода), уместнее будет использовать ПИ- или даже И-регуляторы. Для регулирования уровня жидкостей (объект регулирования без самовыравнивания) вполне подойдет и простой П-регулятор.

Современные регуляторы заключают в себе характеристики всех типов регуляторов. Путем простой настройки удастся получить устройство, в наибольшей степени подходящее для решения поставленной задачи регулирования.

Таблица 1. Достоинства и недостатки разных типов регуляторов

	П-регуляторы	И-регуляторы	ПИ-регуляторы	ПД-регуляторы	ПИД-регуляторы
Достоинства	Простая конструкция, работа часто без вспомогательной энергии, легкая настройка	Отсутствие остаточного рассогласования	Отсутствие остаточного рассогласования. Немедленное регулирующее воздействие, благоприятная регулировочная характеристика	Стремительное и резкое регулирующее воздействие	Отсутствие остаточного рассогласования. Немедленное и резкое регулирующее воздействие, благоприятная регулировочная характеристика

Недостатки	Остаточное рассогласование. Не годится для объектов регулирования с выдержкой времени	Относительно медленная реакция регулятора. Склонность к неконтролируемым колебаниям	Точно медленная компенсация рассогласования с настройкой на заданное значение	Остаточное отклонение регулируемой величины от заданного значения	Не годится при необходимости использования Д-составляющей
------------	---	---	---	---	---

В таблице 2 приведены самые распространенные регулируемые параметры в химическом производстве и рекомендуемые для них типы регуляторов.

Таблица 2. Типы регуляторов для определенных задач регулирования

Регулируемая величина	П-регулятор	И-регулятор	ПИ-регулятор	ПД-регулятор	ПИД-регулятор
Температура	условно годен	не годится	хорошо подходит	условно годен	хорошо подходит
Давление	условно годен	хорошо подходит	хорошо подходит	не годится	не годится
Расход	не годится	хорошо подходит	условно годен	не годится	не годится
Уровень жидкости	годится	не годится	условно годен	не годится	условно годен

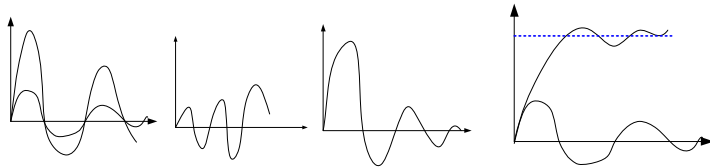
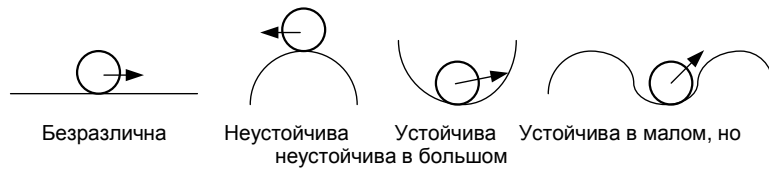
### 3.5. Качество процесса управления

#### 3.5.1. Устойчивость САУ и критерии устойчивости

##### 3.5.1.1. Устойчивость САУ

*Устойчивость* – способность системы восстанавливать состояние равновесия из которого она была выведена в результате какого-либо воздействия (изменение задающего воздействия  $y_{зад}$ , появление возмущений  $f$ ).

Физическая трактовка:



Поведение САУ при наличии в ней возмущающих  $f$  и управляющих  $y_{зад}$  воздействий описывается дифференциальным уравнением

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = b_0 \frac{d^m x}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx}{dt} + b_m x \quad (*)$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n$  и  $b_0, b_1, \dots, b_m$  – постоянные коэффициенты.

Чтобы ответить устойчива система или нет, надо решить уравнение (\*), т.е. найти корни характеристического уравнения. Однако во многих случаях решение уравнения данного вида затруднено и используют критерии, позволяющие без непосредственного решения уравнения судить об устойчивости системы.

##### 3.5.1.2. Алгебраический критерий Рауса-Гурвица

Проверка на устойчивость сводится к вычислению по коэффициентам  $a$  в характеристическом уравнении

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0$$

определителей Гурвица  $\Delta$ .

*Критерий Рауса-Гурвица:* разомкнутая САУ устойчива, если все коэффициенты  $a$  и определители Гурвица  $\Delta$  положительны, т.е. соблюдаются необходимые условия:  $a_0, a_1, \dots, a_n > 0$  и достаточные:  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n > 0$

Коэффициенты  $a$  непосредственно берутся из характеристического уравнения, а матрица для нахождения определителей Гурвица  $\Delta$  составляется по следующим правилам:

- 1) по главной диагонали выписываются по порядку  $n$  коэффициентов характеристического уравнения (от  $a_1$  до  $a_n$ );
- 2) строки с нечётными и чётными индексами чередуются;
- 3) недостающие элементы матрицы заполняются нулями.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

$\Delta = a_1$  – уравнение 1-го порядка.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} \text{ – уравнение 2-го порядка.}$$

$$a_0, a_1, a_2, a_3 > 0$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\Delta = a_0 a_2 - a_1 a_3 > 0$$

$$\begin{vmatrix} 0 & a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}$$

$$a_0 a_2 a_4 + a_1 a_3 a_4 - a_0 a_1 a_3 - a_0 a_2 a_4 > 0$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0$$

Если  $A$  – матрица порядка  $n \times n$ , то

$$\det A = \sum_{i=1}^n a_{ii} (-1)^{i+1} (M_{ii})$$

где  $M_{ii}$  – представляет собой подматрицу матрицы  $A$ , полученную исключением строки  $i$  и столбца  $i$ .

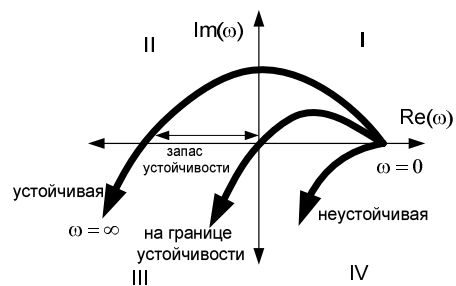
*Достоинство:* простота, *недостаток:* трудно оценить границу устойчивости.

### 3.5.1.3. Графоаналитический критерий Михайлова

*Критерий Михайлова:* замкнутая САУ  $n$ -го порядка устойчива, если годограф (кривая) Михайлова при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$  начиная с положительной действительной оси  $Re$ , обошёл последовательно против часовой стрелки  $n$ -квadrатов комплексной плоскости.

Построение годографа Михайлова для анализа устойчивости САУ проводят в следующей последовательности:

- в характеристическом уравнении заменяют  $p \rightarrow j\omega$ ;
- выделяют действительную  $Re(\omega)$  и мнимую  $Im(\omega)$  части;
- задавая частотой  $\omega$  от 0 до  $\infty$  определяют  $Re(\omega)$  и  $Im(\omega)$  и строят кривую (годограф) Михайлова.

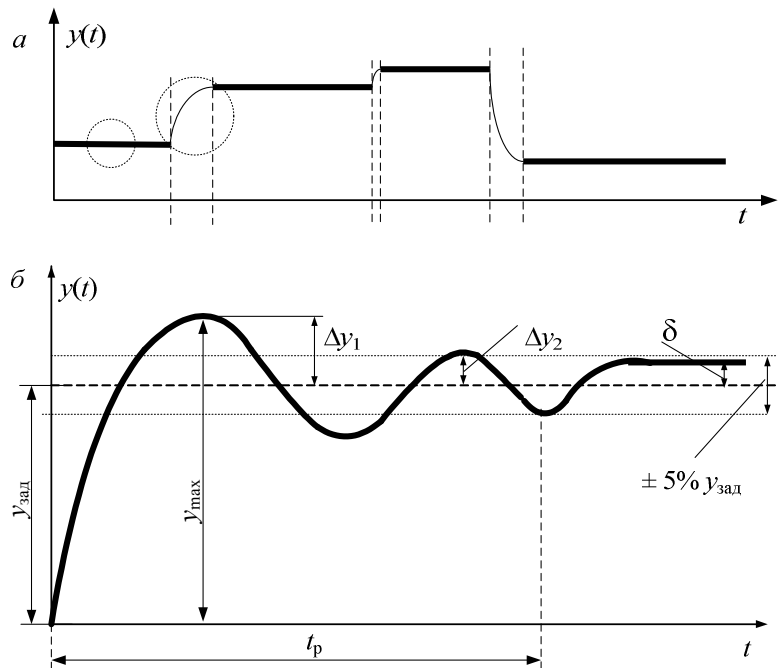


Система 3-го порядка (устойчива, когда проходит против часовой стрелки три квадранта). Хорошо виден запас устойчивости САУ

*Достоинство:* дает оценить запас устойчивости.

### 3.5.2. Показатели качества САУ

При эксплуатации САУ ее устойчивость (см. 3.3.1.) является необходимым условием её работоспособности. Достаточным условием является обеспечение показателей качества процесса регулирования, которые определяются из *переходного процесса*, т.е. процесса при котором ОУ переходит из одного режима в другой.



**Рис. 3.1.** Типичная временная диаграмма работы технологического оборудования. Жирными горизонтальными линиями обозначены участки работы оборудования при заданном режиме ( $y$  – любая технологическая переменная), а тонкой – переходные процессы, осуществляемые САУ для перевода (перехода) ОУ из одного заданного режима в другой б) типичный вид переходного процесса с указанием его основных характеристик

Показатели качества САУ оцениваются следующими основными количественными характеристиками переходного процесса:

а) *время регулирования*  $t_p$  – время, в течении которого, начиная с момента приложения воздействия к системе, отклонение регулируемой величины  $y(t)$  отличается от нового установленного, т.е.  $y_{зад}$  на  $\pm 5\%$ .

Характеризует быстродействие системы: чем меньше  $t_p$ , тем лучше система реагирует на изменение задания и внешние возмущения.

б) *перерегулирование*  $\sigma$  – отношение величины первого отклонения (от заданного значения) к заданному значению  $y_{зад}$

$$\sigma = \frac{|y_{max} - y_{зад}|}{|y_{зад}|} 100\%$$

Перерегулирование не должно превышать 10-30%. Характеризует колебательность системы.

в) *статическая ошибка (точность)*  $\delta$  – величина отклонения установившегося значения регулируемой величины  $y(\infty)$  от заданного  $y_{зад}$  (её ещё называют остаточным отклонением)

$$\delta = y_{зад} - y(\infty)$$

Характеризует точность системы: чем меньше  $\delta$ , тем точнее система устанавливает выходную переменную  $y$  на заданное значение  $y_{зад}$ .

г) *колебательность*  $m$  – число колебаний регулируемой величины за время переходного процесса.

д) *степень затухания*  $\phi$  – отклонение разности двух соседних амплитуд колебаний направленных в одну сторону к первой из них

$$\phi = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{\Delta y_1}; \quad \phi = 1 - e^{-2\pi m}$$

при  $\phi = 0$  – возникают незатухающие колебания с постоянной амплитудой,

при  $\phi = 1$  – переходный процесс стремится к аperiodическому (т.е. без колебаний).

Это прямые оценки определения качества: по графику переходного процесса, снятого экспериментально. Его не всегда можно получить, поэтому используют косвенные оценки (без построения графика).

1. Интегральный метод – без решения дифференциальных уравнений системы:

а) без перерегулирования  $I_1 = \int_0^{\infty} y(t) dt$

б) колебательный  $I_2 = \int_0^{\infty} y^2(t) dt$  .

Чем меньше критерии  $I_1$  и  $I_2$ , тем лучше. Оценка качества САУ происходит по площади, заключённой между кривой переходного процесса и осями координат (д.б. минимальной).

2. Частотный метод: по вещественной частотной характеристике системы  $Re$ :

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{Re}(\omega)}{\omega} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega$$

### 3.6. Методы выбора и расчета регуляторов

#### 3.6.1. Выбор регулятора

Цель: выбор наиболее дешевого и простого в эксплуатации регулятора, обеспечивающего при различных возмущениях заданное качество регулирования.

Для его выбора необходимо знать характеристики ОУ, т.е.  $T$  – емкость объекта и  $\tau$  – запаздывание.

Области применения различных регуляторов.

	Дискретные		Непрерывные			
	релейный	импульсный	П-регулятор	И-регулятор	ПИ-регулятор	ПИД-регулятор
хар-ка ОУ	Большие $T$ , малые $\tau$	Большие $T$ , большие $\tau$	Средние $T$ , небольшие $\tau$ и плавное изменение нагрузки	в ОУ с самовыравниванием (любое $T$ ), небольшие $\tau$ , плавное изменение нагрузки	Любые $T$ большие $\tau$ , но медленное изменение нагрузки	Любой $T$ и $\tau$ , при больших и резких колебаниях нагрузки

Таким образом, мы можем предварительно выбрать регулятор в зависимости от известных характеристик ОУ.

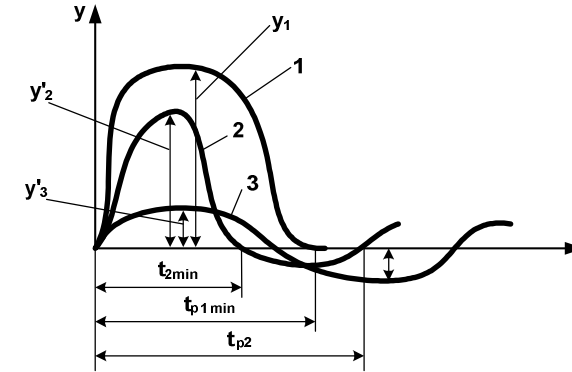
Для расчета автоматического регулятора необходимо:

- выбрать тип регулятора (непрерывный, дискретный).
- рассчитать его оптимальные настройки ( $k_p$ ,  $T_{ин}$ ,  $T_{п}$ ).

Качество регулирования определяется не только законом регулирования, но и значениями коэффициентов регулятора (т.е.  $k_p$ ,  $T_{ин}$ ,  $T_{п}$ , настройками). При их различных настройках для одного и того же регулятора можно получить различные переходные процессы, которые отличаются:  $t_p$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$ .

Для определения качества работы САУ с регуляторами, имеющими различные законы регулирования, их сравнивают с типовыми (оптимальными) переходными процессами. Тогда выбор и расчет оптимальных настроек регулятора сводится к получению оптимальных переходных процессов регулирования. Для непрерывных технологических процессов применимы три оптимальных переходных процесса регулирования:

- апериодический (граничный);
- с 20% перерегулированием;
- с минимальной квадратичной площадью отклонения.



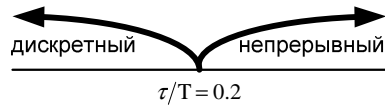
1. *апериодический* – характеризуется минимальным  $t_{p1}$  (временем регулирования), отсутствием  $\sigma(y_2)$  и минимальным регулирующим воздействием (целесообразно, когда регулирующее воздействие может повлиять на другие регулируемые величины).

2. *с 20% перерегулированием* – характеризуется некоторым перерегулированием  $y_2$  (которое допустимо по требованиям к процессу регулирования) и минимальным временем 1-го полупериода колебаний  $t_{2min}$

3. *с минимальной квадратичной площадью отклонения*  $\left[ \min \int_0^{\infty} y^2 dt \right]$  характеризуется временем регулирования. Перерегулирование  $y_3$  достигает (30-40%) от  $y_3$ , время регулирования  $t_{p3}$  max в данной системе. Однако ему свойственна наименьшая величина максимального динамического отклонения.  $\rightarrow y_3(\min)$  – т.е. перерегулирование минимально.

При инженерном выборе типа регулятора, важное значение имеет отношение  $\tau T$ . Если  $\tau T > 0,2 \rightarrow$  регулятор непрерывного действия,

$\tau T < 0,2 \rightarrow$  регулятор дискретного действия.



При выборе закона регулирования должны быть правильно сформулированы требования к переходному процессу: а) максимальное динамическое отклонение регулируемой величины от заданного (ошибка регулирования), б) время регулирования, в) статическая ошибка, г) степень колебательности.

### 3.6.2. Расчет параметров настройки регулятора

После выбора типа регулятора (непрерывный, дискретный) рассчитывают его настройки ( $k_p$ ,  $T_n$ ,  $T_D$ ). Для этого используют следующие характеристики:

а) *степень воздействия регулятора*. Характеризуется динамическим коэффициентом регулирования  $R_d$

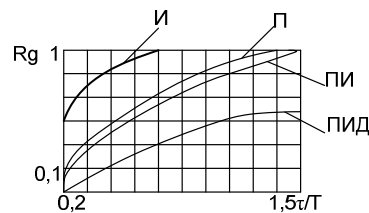
$$R_d = \frac{y_1(t)}{y_0(t)}$$

где  $y_1(t)$  – максимальное отклонение регулируемой величины  $y_1(t)$  от задания в процессе регулирования вызванное однократным ступенчатым возмущением.

$y_0(t)$  – отклонение при том же возмущении, но без регулирующего воздействия.

$$y_0(t) = k_{об} \cdot x_{вх}(t)$$

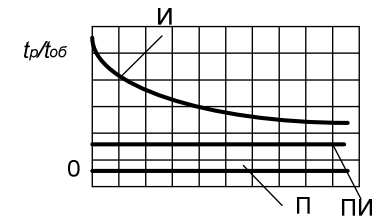
Существует монограмма



Наибольший динамический коэффициент  $R_d$  имеет место в САУ с И-регулятором. Более меньшее будет при П и ПИ- регуляторах, однако при П-регуляторе наблюдается остаточное отклонение регулируемой величины от заданной. Минимальное  $R_d$  достигается при использовании ПИД-регулятора.

Величина  $R_d$  одного и того же регулятора зависит от характера переходного процесса. Он всегда максимален для аperiodического процесса и убывает по мере увеличения перерегулирования. С увеличением  $\tau/T$   $R_d$  быстро возрастает к 1, а эффективность воздействия регулятора на максимальное отклонение при этом снижается.

б) *продолжительность переходного процесса*. Она зависит от характера переходного процесса.



в) *время регулирования*. Минимальное  $t_p$  при использовании П- и ПИ-регуляторов ( $t_p$  ПИ-регулятора вдвое больше П-регулятора)

При использовании П-, ПИ-, ПИД- регулятора, относительное время регулирования величина постоянная для любых (определяется только характером переходного процесса). При использовании И- регулятора  $\tau/T$  значительно меняется. Только при приближении  $\tau/T$  к 1 она сравнима с П-, ПИ-, ПИД- регуляторами.



## 4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

### 4.1. Основные определение и классификация

Данные САУ применяются для управления процессами и оборудованием с циклическим режимом работы (пуск и остановка сложных технологических систем, логическая последовательность действий узлов, механизмов, транспортеров и т. п.), сигнализация). В таких системах информация поступает от элемента к элементу в дискретном виде.

По способу действия системы логического управления (СЛУ) классифицируют:



### 4.2. Математическое описание работы дискретных СЛУ (уравнения алгебры логики и таблицы состояния)

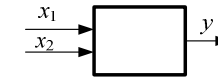
Используемый математический аппарат – двухзначная алгебра логики, т.е. входные и выходные переменные могут принимать только два основных значения (различные взаимоисключаемые действия):



*Логическая переменная* – величина способная принимать только два значения: 0 или 1.

*Логическая функция* – зависимость выходных переменных от входных и применяются только два значения: 1 и 0. (число комбинаций  $N=2^n$ , где  $n$  – число переменных). Она описывается как:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \text{ т.е. } y \text{ – есть функция логических переменных } x_1, x_2, \dots, x_n.$$



Существуют несколько основных логических структур: И, ИЛИ, НЕ на основании которых можно построить любую СЛУ.

а) функция И (логическое умножение)

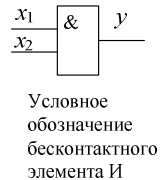
Уравнение алгебры логики

$$y = x_1 \cdot x_2 \text{ (} y \text{ истинно, если истинны } x_1 \text{ и } x_2 \text{)}$$

Реализация

Таблица состояния

$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



б) функция ИЛИ (логическое сложение)

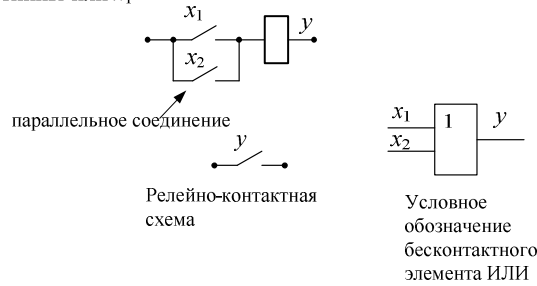
Уравнение алгебры логики

$y = x_1 + x_2$  ( $y$  истинно, если истинны или  $x_1$  или  $x_2$  или оба одновременно)

Таблица состояния

$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Реализация

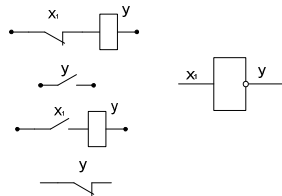


в) функция НЕ (логическое отрицание)

Логическое уравнение  $y = \bar{x}_1$  ( $y$  истинно если  $x_1$  ложно и наоборот).

Таблица состояния

$x_1$	$y$
0	1
1	0



При построении СЛУ для управления технологическим процессом необходимо стремиться к получению математических уравнений алгебры логики, имеющих минимальное число логических переменных (элементов). Данная минимизация осуществляется с помощью преобразований, основанных на аксиомах и законах алгебры логики.

**4.3. Основные преобразования алгебры логики**

1. Аксиомы (тождества)

$$\begin{aligned}
 1 + X &= 1 & 1 \cdot X &= X \\
 0 + X &= X & 0 \cdot X &= 0 \\
 X + X &= X & X \cdot X &= X \\
 X + \bar{X} &= 1 & X \cdot \bar{X} &= 0 \\
 \overline{\bar{X}} &= X
 \end{aligned}$$

P.S. Сложение подразумевает параллельное соединение элементов, умножение – последовательное.

2. Законы

а. Переместительный (коммутационный)

$$x_1 x_2 = x_2 x_1 \quad x_1 + x_2 = x_2 + x_1$$

б. Сочетательный

$$x_1 (x_2 \cdot x_3) = (x_1 \cdot x_2) \cdot x_3 \quad x_1 + (x_2 + x_3) = (x_1 + x_2) + x_3$$

в. Распределительный

$$x_1 (x_2 + x_3) = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3$$

г. Поглощение

$$x_1 (x_1 + x_2) = x_1 \quad x_1 + x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + \dots + x_1 x_n = x_1$$

д. Инверсии

$$\overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 \quad \overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$$

Пример. Минимизировать логическое уравнение

а)  $x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3 = x_1 \cdot x_2 (1 + x_3) + x_2 \cdot x_3 = x_2 (x_1 + x_3)$

$(x_1 \cdot \bar{x}_2 + x_3) \cdot (x_1 + \bar{x}_2) \cdot x_3 = (x_1 \cdot \bar{x}_2 + x_1 \cdot x_3 + x_1 \cdot \bar{x}_2 + \bar{x}_2 \cdot x_3) \cdot x_3 =$

б)  $= (x_1 \cdot \bar{x}_2 + x_1 \cdot x_3 + \bar{x}_2 \cdot x_3) \cdot x_3 = (x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_3 + \bar{x}_2 \cdot x_3) =$

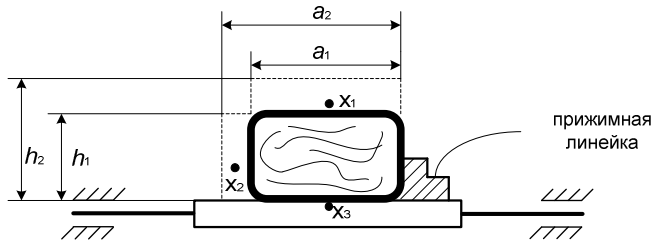
$= x_3 [\bar{x}_2 \cdot (x_1 + 1) + x_1] = x_3 \cdot (x_1 + \bar{x}_2)$

#### 4.4. Синтез одноконтурных СЛУ

Осуществляется на основе таблиц состояния.

*Пример.* Система контроля толщины брусковых изделий.

Детали (градации по ширине  $a_1$  и  $a_2$  и по высоте  $h_1$  и  $h_2$ ) перемещаются по роликовому конвейеру. Система логического управления должна обеспечить автоматическое включение индикации в соответствии с размером брусков.



1. Определяется число выходных сигналов: сочетание 2-х значений толщины и 2-х высоты, т.е. 4 сигнала ( $y_1, y_2, y_3, y_4$ ) которые подаются на индикатор (лампу).

Количество входных зависит от конструкции:  $x_1 = 0$  и  $x_2 = 0$  – тонкие и не широкие бруски,  $x_1 = 1$  и  $x_2 = 1$  – толстые и высокие бруски,  $x_3$  – наличие на конвейере бруса.

2. Составляется таблица состояний (число комбинаций  $N = 2^3 = 8$ , где 3 – число входных переменных). Серым выделен случай отсутствия на конвейере бруса.

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	1

3. Получение логических функций  $y$  для тех строк, где она равна 1 (если  $x = 0$  – с отрицанием, если  $x = 1$  – без отрицания)

$$y_1 = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3$$

$$y_2 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$y_3 = x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot x_3$$

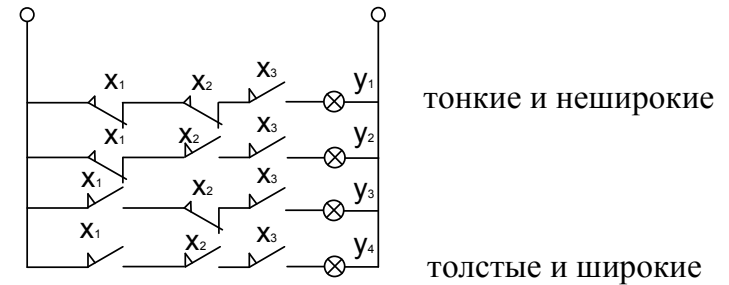
$$y_4 = x_1 \cdot x_2 \cdot \overline{x_3}$$

4. Составляется общее логическое уравнение системы, а затем оно минимизируется с использованием основных преобразований алгебры логики

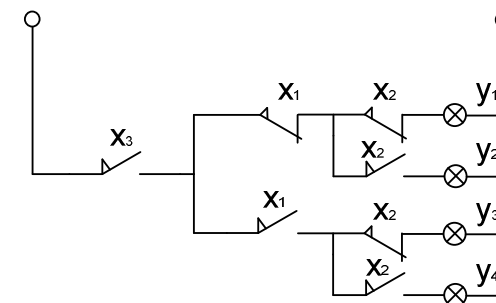
$$y = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot y_1 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot y_2 + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot y_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} \cdot y_4$$

$$y_{мин} = x_3 [ \overline{x_1} (\overline{x_2} \cdot y_1 + x_2 \cdot y_2) + x_1 (\overline{x_2} y_3 + x_2 y_4) ]$$

5. Построение принципиальной электрической схемы управления  
исходная схема



минимизированная схема



#### 4.5. Построение СЛУ на основе циклограмм

Циклограмма – это графическое изображение последовательности работы отдельных элементов СЛУ во времени. Работа элементов дискретного действия в логическом устройстве характеризуется появлением и исчезновением сигналов в определенной последовательности.

Наличие сигнала изображается на циклограмме отрезком горизонтальной прямой: толстой линией – сигналы входных и выходных элементов, тонкой – дополнительных, промежуточных элементов, пунктиром – условное включение элемента.

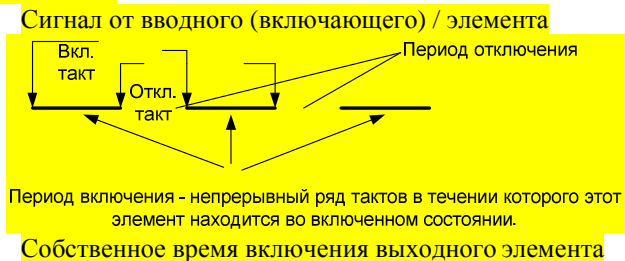
Слева от отрезка, отражающего работу элемента, на границе циклограммы проставляется обозначение соответствующего сигнала. Последовательность работы элементов определяется положением концов отрезков, изображающих их работу, относительно левой границы циклограммы. На циклограмме отражается любое изменение состояния элементов и указывается собственное время их срабатывания.

(рис.1).

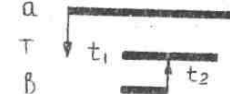
Воздействие одного элемента на другой изображается на циклограмме стрелкой, указывающей направление воздействия.

В циклограмме время не оценивается количественно, поэтому она выполняется без масштаба. Отличают лишь факт срабатывания элемента, факт наличия или отсутствия сигнала. При наличии специального элемента задержки его сигнал на циклограмме обозначается буквой Т, а время, по истечении которого он появляется или исчезает, – буквой t (рис.).

На рис.3 а показаны варианты воздействия элемента Q на элемент X при его включении. В первом варианте элемент X включается при появлении сигнала Q, а во втором – при его исчезновении. На рис. 3 б представлены варианты воздействия элемента Q на элемент X при его отключении.



Собственное время отключения выходного элемента



Время' наличия входного (отключающего) сигнала

Тактами называются периоды, в течение которых в схеме не изменяется состояние ни одного из входных, промежуточных или выходных сигналов. Каждое изменение состояния одного или одновременно нескольких элементов является началом нового такта.

Периодом включения элемента называется непрерывный ряд тактов, в течение которого этот элемент находится во включенном состоянии. Период отключения элемента – непрерывный ряд тактов, в течение которого элемент находится в отключенном состоянии.

Включающим тактом называется такт, предшествующий периоду включения данного элемента, отключающим – такт, предшествующий периоду отключения данного элемента.

Включающий период состоит из включающего такта и периода включения без отключающего такта. Отключающий период состоит из отключающего такта и периода отключения без включающего такта (понятие отключающего периода вводится при наличии нескольких периодов включения).

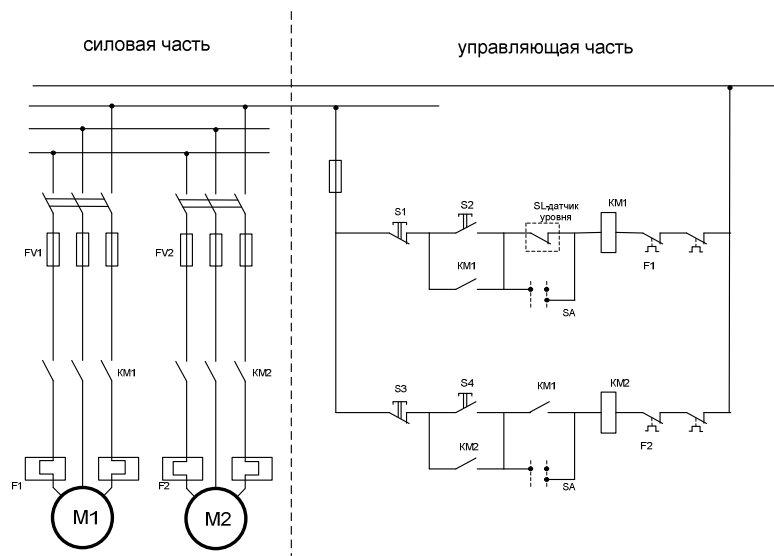
Методика заполнения циклограммы:

- 1) вычерчивается циклограмма с разбивкой на такты, но без нумерации;
- 2) слева записываются входные и выходные сигналы;
- 3) просматриваются такты по вертикали и в каждой строке, в зависимости от состояния командного или исполнительного органа наносится или пропускается линия;
- 4) такту присваивается номер, если в нем появилась или исчезла хотя бы одна линия;
- 5) к изменившимся в такте выходным сигналам направляются стрелки от входных сигналов, вызвавших эти изменения;
- 6) заполненная циклограмма проверяется на повторяемость тактов: одинаковые такты не должны иметь разные номера;
- 7) отыскиваются и объединяются в группу такты повторяющиеся многократно.

#### 4.6. Типовые схемы блокировок, применяемые в СЛУ

а) блокировочные связи, обеспечивающие наладочный режим

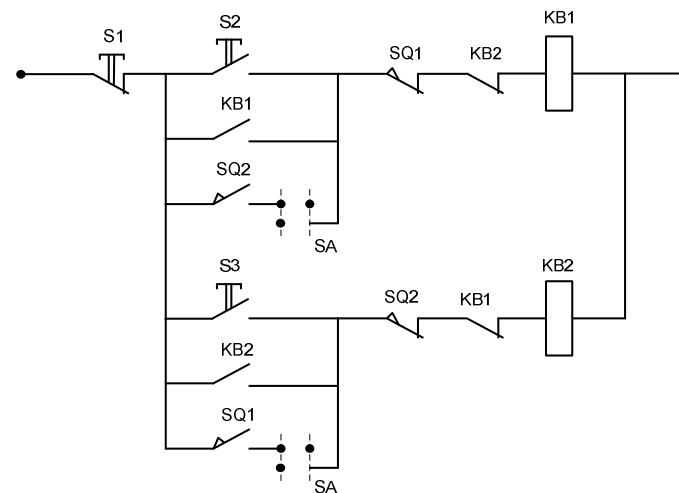
Наладочные операции предназначены для опробования отдельных элементов или узлов конвейера, агрегата, станка (установка и проверка обрабатываемых изделий).



б) блокировочные связи, обеспечивающие ограничение пути перемещения.

Осуществляется при помощи конечных (путевых) выключателей SQ1 и SQ2. Применение данных связей вызвано следующими особенностями работы станка:

- остановка в крайнем положении узла станка;
- остановка по окончанию рабочего цикла;
- исключение столкновения узлов механизма;
- автоматизация цикла работы в станках.



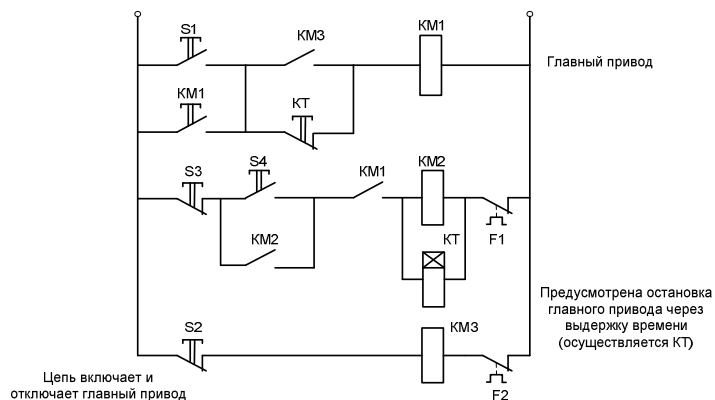
в) блокировочные связи, обеспечивающие согласование работы отдельных узлов станка.

Станки управляются отдельными блоками, не имеющими механических связей и поэтому возникает необходимость введения их в работу в определенной последовательности.

К таким узлам можно отнести:

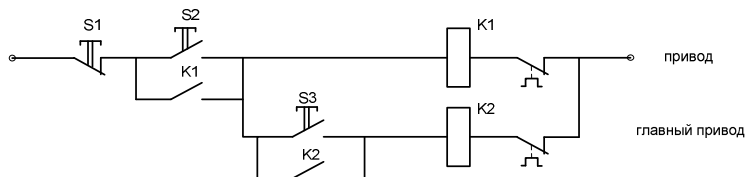
- механизм главного движения (привод);
- механизм подачи;
- вспомогательные механизмы (зажим изделия, механизм уклона пильной рамки и т.д.);
- насосы смазки и т. п.

в<sub>1</sub>) схема согласования работы главного привода и привода подачи

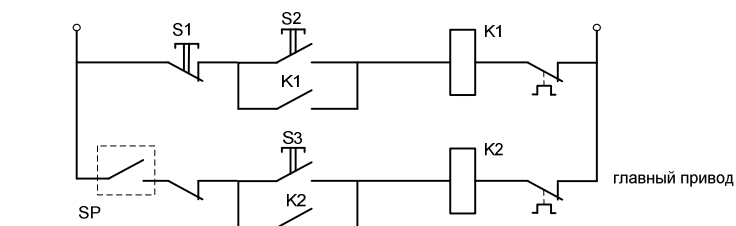


Включение главного привода (S1) должно препятствовать включению привода подачи во избежание поломки инструмента. При отключении наоборот → привод подачи отключается. Это обеспечивает цепь с контакторами KM3, т.е. кнопка S2 отключает KM3 → свой контакт в KM1 через время заданное реле временем КТ отключается и KM1.

в<sub>2</sub>) схема согласования главного привода и привода насоса смазки  
Существует два варианта подключения:  
– при неизвестном давлении в системе смазки



– главный привод включается при нормальном давлении в системе смазки (с помощью реле давления SP)



????? давления в системе смазки вызывает отключение главного привода.

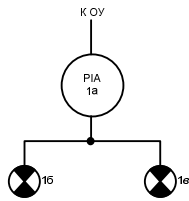
#### 4.7. Типовые схемы сигнализации

Данные схемы должны обеспечивать:

- а) одновременную подачу светового и звукового сигналов,
- б) съём звукового сигнала (нажатием кнопочного выключателя),
- в) повторное срабатывание исполнительного устройства звуковой сигнализации (при вторичном отклонении параметра) после его отключения нажатием кнопочного выключателя.

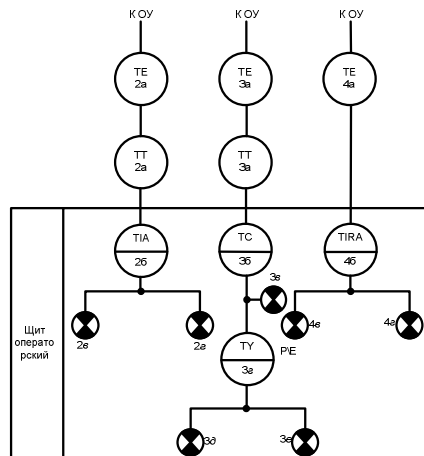
Типовые функциональные схемы технологической сигнализации на один параметр.

- а) схемы местной сигнализации



1а – электроконтактный манометр, 1б, 1в – электрические лампы.

- б) схемы дистанционной сигнализации



2а, 3а – манометрические термометры; 4а – термоэлектрический преобразователь; 2б – электроконтактный манометр; 3б – двухпозици-

онный регулятор; 3з – пневмоэлектрический преобразователь; 4б – потенциометр сигнализирующий (с контактным устройством); 2в, 2г, 3в, 3д, 3е, 4в, 4г – электрические лампы.

Принципиальная электрическая схема сигнализации.

При замыкании технологического контакта Р включается сигнальная лампа НЛ. Параллельно лампе можно подключить звуковой сигнализатор (звонок и т. п.).

Недостаток: - звонок работает все время, пока замкнут контакт Р.

## 5. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

### 5.1. Автоматизированные системы управления (АСУ)

Автоматизированная система управления предприятием (АСУП) — комплекс программных и технических средств, предназначенный для автоматизации управления производственными, экономическими и организационными процессами на предприятии.

Под автоматизированной системой управления технологическими процессами (АСУ ТП) обычно понимается комплексное решение, обеспечивающее автоматизацию основных технологических операций на производстве в целом или каком-то его участке, выпускающем относительно завершённый продукт.

Здесь важно сделать акцент на слове «автоматизированная». Под этим подразумевается, что система управления отнюдь не полностью автономна (самостоятельна), и требуется участие человека (оператора) для реализации определенных задач. В тоже время локальные САУ предназначены для работы без какого-либо контроля со стороны человека и полностью автономны. Очень важно понимать эту принципиальную разницу между АСУ и САУ.

Классификация АСУ ТП

- SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) система диспетчерского управления — контроль и мониторинг объектов с участием диспетчера. Термин SCADA часто используется в более узком смысле: многие так называют программный пакет визуализации технологического процесса.

- PLC (Programmable Logic Controller) – программируемый логический контроллер (ПЛК). Под термином ПЛК часто подразумевается аппаратный модуль для реализации алгоритмов автоматизированного управления. Тем не менее, термин ПЛК имеет и более общее значение и часто используется для обозначения целого класса систем.

- DCS (Distributed Control System) распределенная система управления (PCU).

В последние годы внедряются гибридные системы, которые по ряду характерных признаков можно отнести как к одному классу, так и к другому.



## 5.2. Локальные САУ

### 5.2.1. PLC-системы

Основным компонентом системы является программируемый логический контроллер. Системы класса PLC чрезвычайно хороши для управления логической последовательностью технологических операций в процессе изготовления изделия (не продукта, а именно изделия). Как правило, эти операции носят дискретный характер и требуют очень быстрой реакции со стороны автоматики. Типовые задачи PLC-систем:

- управление конвейерными линиями;
- управление робототехникой;
- высокоскоростное управление приводами,
- управление позиционирующими устройствами;
- сигнализация, оповещение.

Для систем PLC характерно то, что они не требуют непрерывного контроля со стороны диспетчера (в отличие от SCADA и DCS), достаточно периодической проверки статуса. Уровень диспетчерского (операторского) управления развит слабо и сводится, как правило, к установке кнопочного пульта управления для запуска/останова того или иного технологического участка или аппарата и отображения аварийных сигнализаций. Большую часть времени система PLC работает без надзора со стороны человека, т.е. в автоматическом (автономном) режиме.

Структура PLC-систем следующая. Один или несколько программируемых логических контроллеров объединяются в сеть с помощью цифровой шины. Обмениваясь по шине данными, контроллеры могут взаимодействовать друг с другом, что необходимо для их согласованной работы. При необходимости к системе также можно подключить пульт локального управления (кнопочный или с ЖК-панелью).

На рис. 1 изображена типовая структура PLC-системы. Четыре программируемых логических контроллера объединены с единой сетью (в данном случае стандарта Industrial Ethernet). К сети также подключена графическая ЖК-панель для локального управления и отображения аварийных сигнализаций.

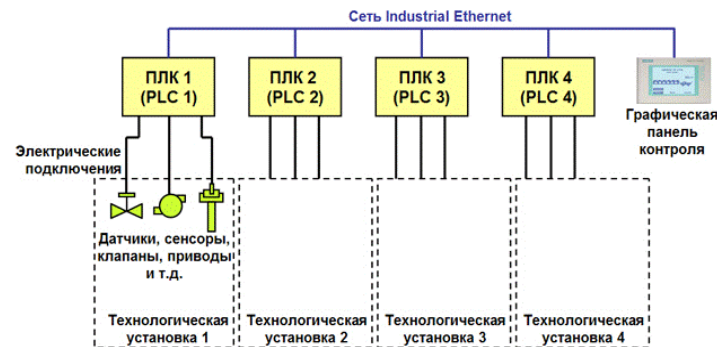


Рис. 1. Типовая структура PLC-системы

Как видно из рисунка, система структурирована так, что каждая технологическая установка (машина, автомат) управляется своим контроллером. Такое технологическое разбиение характерно для данного класса систем.

Как правило, у контроллеров есть электрические входы/выходы для подключения к ним полевых датчиков, сенсоров, исполнительных механизмов (клапанов, позиционирующих устройств, различных приводов), устройств оповещения и сигнализации. Количество входов/выходов может быть как фиксировано, так и расширяемо с помощью дополнительно подключаемых модулей. Такие модули называются «модулями ввода/вывода» (IO modules). Контроллер непрерывно выполняет заложенную в него программу управления по следующему циклу: считывание сигналов с датчиков, математическая обработка данных в соответствии с определенным алгоритмом, формирование управляющего воздействия и его передача на исполнительные механизмы. При этом требуется высокое быстродействие – время выполнения всего цикла составляет не более 10-20 мс.

Для систем класса PLC характерны следующие аспекты

- высокоскоростное управление дискретными операциями;
- отказоустойчивость системы управления не критична: в случае останова технологический процесс возобновляется в короткие сроки и с минимальными потерями;
- высокая степень автономности (практическое отсутствие операторского уровня);
- быстрая реакция на дискретные события;
- жесткая временная синхронизация работы нескольких узлов.

## 5.2.2. DCS-системы

Распределенные системы управления (PCU) (DCS) — применяются для управления непрерывными технологическими процессами, т.е., возобновление которых после останова связано с большими издержками. Это сильно отличается от конвейера (применение PLC-систем), который можно остановить и запустить заново достаточно быстро, при этом без каких-либо глобальных затрат.

Из вышесказанного вытекает главное требование к PCU — отказоустойчивость. Для PCU отказ, а соответственно и останов технологического процесса, недопустим. Высокая отказоустойчивость достигается путем резервирования (как правило, дублирования) аппаратных и программных компонентов системы, использования компонентов повышенной надежности, внедрения развитых средств диагностики, а также за счет технического обслуживания и непрерывного контроля со стороны человека.

PCU чрезвычайно функциональны и масштабируемы: на их базе автоматизируются технологические установки, производственные цеха, а иногда и целые предприятия. Для характеристики масштаба PCU часто используют специальный термин «количество переменных ввода/вывода». Одна переменная ввода/вывода — это либо сигнал измерения, получаемый с датчика (например, текущее давление пара в котле), либо управляющий сигнал, воздействующий на исполнительный механизм (команда пуска насоса, например). Современные PCU способны обрабатывать до 50000 переменных ввода/вывода, что соответствует большому предприятию. Из этого следует еще два требования к PCU:

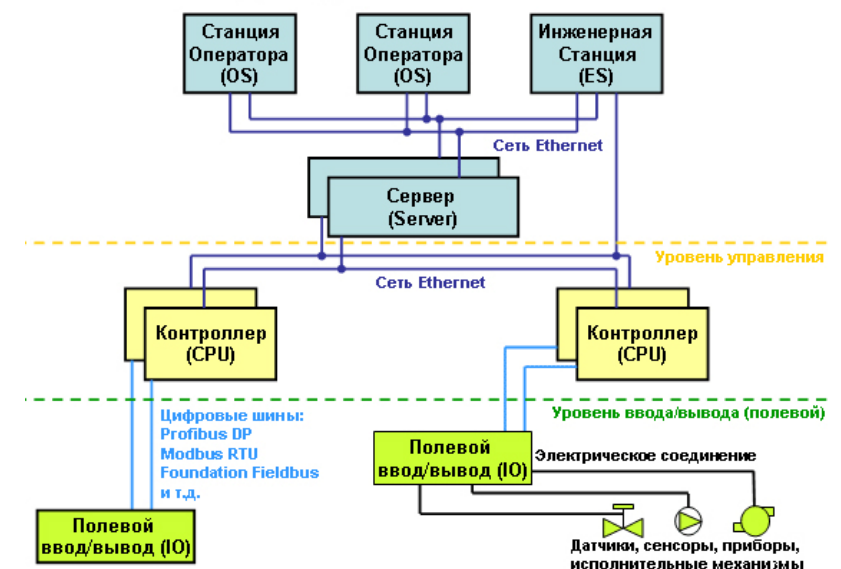
1. Масштабируемость. PCU должна одинаково хорошо подходить для автоматизации как одной установки, так и для всего предприятия. При этом система должна легко расширяться для того, чтобы охватить новые производственные участки (цеха). Расширение системы должно по возможности проходить без остановки уже внедренных участков системы (расширение online).

2. Простота разработки и конфигурирования. Конфигурирование таких масштабных систем, как PCU, — это тяжелый и долгий труд. Система должна предлагать набор подготовленных программных компонентов и средств разработки. К ним относятся: пакеты визуального программирования, графические библиотеки, функциональные блоки, преднастроенные сетевые протоколы и интерфейсы. Степень интеграция программных компонентов, входящих в состав PCU, дос-

точно велика. Один из главных принципов построения PCU — единая конфигурационная база системы. Изменения, выполненные в одном программном модуле системы, должны автоматически отражаться во всех зависимых модулях.

Из самого названия «распределенная система управления» становится очевидным, что подобные системы могут охватывать множество территориально распределенных объектов (до нескольких километров). Типовая структура PCU изображена на рисунке ниже.

### Типовая структура PCU



Для большинства PCU характерна трехуровневая модель построения. На нижнем уровне, уровне ввода/вывода (IO Layer), располагаются полевые приборы (датчики, исполнительные механизмы), которые с помощью электрических кабелей подключаются к подсистеме полевого ввода/вывода (IO subsystem).

Электрический сигнал, поступающий с датчика, в подсистеме ввода/вывода интерпретируется как измерение определенной физической величины (температуры воды, например), потом сигнал оцифровывается (переводится из аналоговой формы в цифровую, двоичную). В цифровой форме сигнал передается по специальной шине в контроллер.

Подсистема ввода/вывода работает и в другом направлении. Получив от контроллера по той же шине управляющую команду, подсистема ввода/вывода переводит ее из цифровой формы в электрическую аналоговую. Сформированный электрический сигнал по кабелю подается на соответствующий исполнительный механизм.

На рисунке шина, связывающая подсистему ввода/вывода с контроллерами, резервирована (дублирована).

Подсистема ввода/вывода – состоит из аппаратных модулей ввода/вывода. Модули различаются по типу электрического сигнала (с помощью которого они взаимодействуют с полевыми приборами) и по направлению передачи сигнала. Если к модулю подключается датчик – то модуль осуществляет ввод сигнала в систему и называется модулем ввода; если подключается исполнительный механизм – то модуль выводит управляющее воздействие из системы и называется модулем вывода. Образно говоря, подсистема ИО – это глаза и руки системы управления.

На среднем уровне находятся контроллеры – условно говоря, мозги системы – вычислительные машины специального (промышленного исполнения). Их задача – обрабатывать поступающую из подсистемы ввода/вывода информацию и выдавать обратно управляющее воздействие. Эта обработка осуществляется в соответствии с заложенными алгоритмами управления и происходит циклически в среднем 10-20 раз в секунду. Для решения сложных задач контроллеры могут обмениваться между собой данными, используя цифровые коммуникационные сети (в нашем случае, Industrial Ethernet).

Контроллеры PCY могут различаться по производительности, функционалу и архитектуре, хотя существуют и общие требования. Одно из них – возможность менять алгоритмы управления на «лету» (online changes), то есть без остановки процесса управления. Другое важное требование – возможность полного резервирования модулей, в том числе и питания (резервированные контроллеры были изображены на рисунке). Пара контроллеров, синхронно выполняющих одну и ту же программу управления и страхующих друг друга, называется «резервированной парой».

Верхний уровень – это уровень операторского управления, объединяющий серверы и операторские рабочие станции. Выделенный сервер (на рисунке резервирован) поддерживает коммуникацию с подключенными к нему контроллерами и копит внутри себя архив технологических параметров.

Операторские станции OS (operator station) представляют собой

персональные компьютеры. В рамках клиент-серверной архитектуры они ведут обмен данными с сервером, а не напрямую с контроллером. При этом операторских станций может быть несколько десятков.

Операторская станция служит для отображения технологической информации в виде интерактивных графических мнемосхем, а также для эффективного управления процессом. На мнемосхемах показывается исчерпывающая информация: параметры ввода/вывода, значения процессных переменных, аварийные сигнализации, диагностика аппаратных модулей системы, графики, отчеты и т.д. На станции оператор может, например, посмотреть показание любого датчика, вручную закрыть клапан, запустить насос или изменить температурную уставку.

Часто в системе выделяют инженерную станцию ES (engineering station). На ней устанавливаются программные средства разработки, с помощью которых технический специалист может централизованно вносить изменения и дополнения в конфигурацию системы. Часто ES дополняют расширенными средствами диагностики состояния системы. В отличие от OS, ES всегда имеет прямое подключение к контроллерам.

### 5.3. SCADA-системы

#### 5.3.1. Решаемые задачи и общая структура

**Решаемые задачи.** SCADA-система (система диспетчерского управления) – программно-аппаратный комплекс сбора данных и отображения (визуализации).

К основным задачам, решаемым SCADA-системами, относятся:

- обмен данными и обработка информации в реальном времени с УСО (устройством связи с объектом). Этим устройством может быть как промышленный контроллер, так и модуль ввода/вывода;
- отображение информации на экране монитора в понятной для человека форме (Human Machine Interface — (HMI) человеко-машинный интерфейс) в виде мнемосхем (см. 5.3.5.1);
- ведение базы данных реального времени с технологической информацией и ее архивирование (см. 5.3.5.2);
- аварийная сигнализация и управление тревогами и событиями (см. 5.3.5.3);
- генерирование отчетов о ходе технологического процесса;
- обеспечение связи с внешними приложениями (СУБД, электронными таблицами, текстовыми процессорами и т.д.). В системе управления предприятием такими приложениями чаще всего являются приложения, относимые к уровню MES-систем.

Главная особенность SCADA-систем как процесса управления – наличие человека (диспетчера, оператора), действия которого обладают определенной спецификой:

- диспетчер несет, как правило, общую ответственность за управление системой, которая, при нормальных условиях, только изредка требует подстройки параметров;
  - большую часть времени диспетчер пассивно наблюдает за отображаемой информацией. Его активное участие в процессе управления происходит нечасто, обычно в случае наступления критических событий — отказов, аварийных и нестандартных ситуаций и т. д.;
  - действия диспетчера в критических ситуациях могут быть жестко ограничены по времени (несколькими минутами или даже секундами);
  - любое неправильное воздействие может привести к отказу (потере) объекта управления или даже катастрофическим последствиям.
- Обеспечение взаимодействия между человеком (диспетчером,

оператором) и программно-аппаратным комплексом и есть задача человеко-машинного интерфейса (HMI, human machine interface). Очевидно, что чем лучше он организован, тем эффективнее дуэт «человек-система управления» способен решать поставленные задачи.

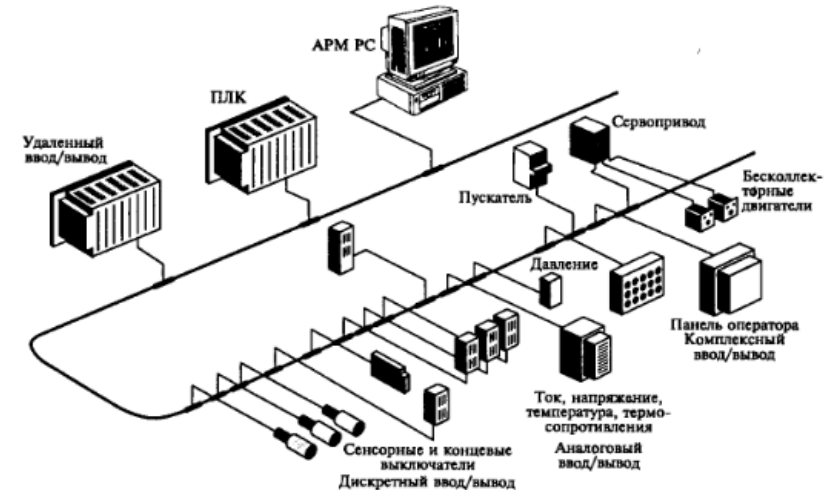
Существует, как минимум, два подхода по реализации HMI:

1. На базе специализированных операторских станций, устанавливаемых в центральной диспетчерской (см. 5.3.3)
2. На базе операторских панелей локального управления, устанавливаемых непосредственно в цеху по близости к технологическим объектам (см. 5.3.4).

Иногда эти два варианта комбинируются, чтобы достичь наибольшей гибкости управления.

**Общая структура SCADA.** Работа SCADA – это непрерывный процесс сбора информации в реальном времени с удаленных точек (объектов) для обработки, анализа и возможного управления.

Требование обработки реального времени обусловлено необходимостью оперативной доставки (выдачи) всех сообщений и данных на центральный интерфейс оператора (диспетчера).



Структура SCADA-системы на основе промышленной сети CAN и модулей серии ADAM-5000.

### 5.3.2. Критерии выбора SCADA-системы

#### 5.3.2.1. Общие подходы

При оценке возможности использования SCADA-системы необходимо учитывать:

- объем данных (производительность, поддержка стандартных сетевых протоколов и форматов данных);
- удобство в работе (стандартизация пользовательского интерфейса, наличие и удобство языка описания данных и процессов);
- описание пакета и эксплуатационных инструкций на русском языке;
- уровень технической поддержки (с учетом доступности);
- надежность (отсутствие рекламаций);
- число инсталляций за рубежом и в СНГ (особенно применимость в промышленных АСУ);
- цена программного продукта.

С ростом мощности компьютеров SCADA-системы становятся масштабируемыми, т. е. могут поддерживать от нескольких сотен до десятков тысяч входов/выходов, а также управлять сложными производствами в целом.

Сегодня на рынке СНГ наиболее распространенными являются следующие SCADA-системы: In Touch (Wonderware, США); WinCC (Siemens, Германия); iFix (Intellution, США); Trace Mode (AdAstrA, Россия); Genesis (Iconics Co, США); Citect (CI Technology, Австралия); Factory Link (United States Data Co, США); RealFlex (BJ SoftWare System, США); Sitex (Jade SoftWare, Великобритания); RTWin (SWD Real Time System, Россия). Лидирующие позиции в разработке SCADA-систем занимают Wonderware Intouch и Simatic WinCC с суммарным количеством инсталляций более 80 тыс. в мире. Пакет визуализации технологического процесса может поставляться как в составе комплексной системы управления, так и в виде отдельного программного продукта. В последнем случае SCADA комплектуется набором драйверов ввода/вывода для коммуникации с контроллерами различных производителей.

При многообразии SCADA-систем возникает проблема выбора одной из них. Критерии оценки с позиций пользователя делят на три группы показателей: эксплуатационные, экономические и технические.

#### 5.3.2.2. Эксплуатационные показатели

Характеризуют скорость освоения продукта и разработки прикладных систем (что в конечном итоге, очень отражается на стоимости составляющих системы управления):

- *качество документации* SCADA-системы: полнота, ясность и наглядность описания первичных документов; русификация и ее качество (экраны, подсказки, справочная система, всевозможные обозначения и т. д.).
- *доступность диалога*: наглядность представления необходимой информации на экране, удобство использования справочной системы, информативность оперативных подсказок и т. д.;
- *уровень сопровождения системы* при ее эксплуатации: возможность внесения изменений в базу данных, коррекции мнемосхем без остановки системы, полнота средств диагностики системы при сбоях и отказах, возможность наращивания разнообразных функций системы, трудоемкость при инсталляции системы и т. д. Сюда можно отнести и доставку необходимой информации на верхний уровень управления;
- *наличие и качество поддержки* SCADA-системы: услуги организации-разработчика, обслуживание (в т. ч. консультации, которые необходимо проводить не только с программистами-разработчиками по месту создания системы, но иногда по месту внедрения на объекте), обучение специалистов, условия обновления версий.

#### 5.3.2.3. Экономические показатели

Выражаются в стоимости следующих составляющих:

- аппаратной платформы;
- системы (средства разработки и среда исполнения);
- разработки системы;
- освоения системы (обучение пользователей);
- сопровождения (консультации, смены версий продукта, прочие услуги);
- окупаемости.

Стоимость SCADA-системы зависит, в первую очередь, от цены системы и числа используемых тэгов (переменных). При этом механизм определения цены различен: в In Touch зависит от количества переменных, используемых в разрабатываемой прикладной программе; в Simplicity определяется количеством каналов ввода/вывода, которые должна поддерживать система; Factory Link имеет высокую ба-

зовую стоимость, но нет ограничений по количеству каналов.

При оценке стоимости учитываются минимальные ресурсы компьютера, необходимые для его установки; в некоторых системах, например, у WinCC число допустимых переменных пропорционально зависит от объема доступного ОЗУ.

#### 5.3.2.4. Технические показатели

**Программно-аппаратные платформы, на которых реализуется SCADA-система.** Для выбора компьютера необходимо знать его платформу (разработанная в одной операционной среде прикладная программа может быть выполнена в любой другой, которую поддерживает выбранный SCADA-пакет), операционную систему, частоту процессора, требуемые объемы оперативной и дисковой памяти. К тому же надо знать информационную мощность отдельной станции — максимальное число вводов/выводов, скорость ввода/вывода, масштабируемость системы и т.д.

Современные системы SCADA работают в рамках существующих операционных систем (в основном различных версий MS Windows) и используют для связи с нижним уровнем стандартные протоколы MS Windows (DDE и OPC).

Место SCADA-систем в программном обеспечении автоматизированного рабочего места (APM) схематически показано на рис. 1.

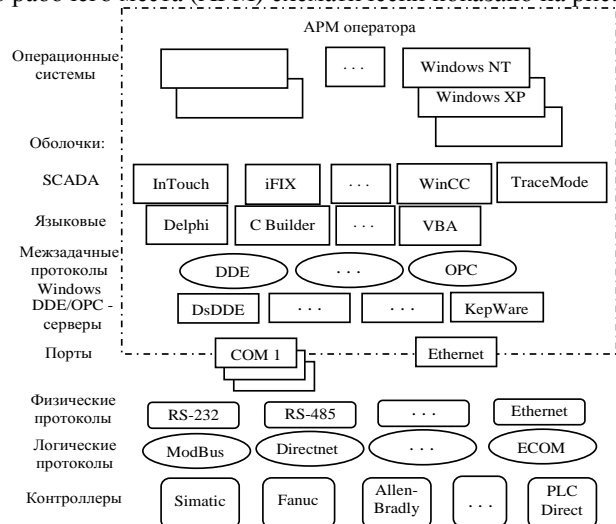


Рис. 1. Программное обеспечение APM

Раньше основу программной платформы составляла ОС PB QNX. Сейчас большинство SCADA-систем реализовано на платформе MS Windows. Такие системы предлагают наиболее полные и легко наращиваемые человеко-машинные интерфейсные средства.

**Средства сетевой поддержки.** В АСУ могут быть задействованы исполнительные механизмы, регистрирующая и обрабатывающая информация аппаратура, рабочие станции операторов, серверы баз данных и т.д. Для эффективного функционирования в этой разнородной среде SCADA-система должна обеспечивать высокий уровень сетевого сервиса. Желательно, чтобы она поддерживала работу в стандартных сетевых средах (industrial Ethernet и др.) с использованием стандартных протоколов (Netbios, TCP/IP и др.), а также обеспечивала поддержку наиболее популярных сетевых стандартов из класса промышленных интерфейсов (Profibus, Canbus, LON, Modbus и др.) (рис. 2).

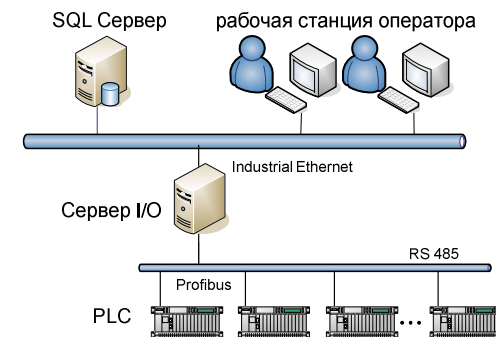


Рис. 2. Сетевое соединение оборудования в SCADA

**Поддерживаемые базы данных.** Для функционирования баз данных (сбор, анализ, хранение, сжатие, пересылка и т.д.) используют ANSI SQL синтаксис, который является независимым от типа базы. Таким образом, приложения виртуально изолированы, что позволяет менять базу данных без серьезных изменений самой прикладной задачи, создавать независимые программы для анализа информации.

**Встроенные командные языки.** Большинство SCADA-систем имеет встроенные языки программирования высокого уровня (например VBA), позволяющие разрабатывать конкретные приложения.

**Открытость систем.** Программная система является открытой, если для нее определены и описаны используемые форматы данных и

процедурный интерфейс. Это позволяет адаптировать пакет под конкретные нужды с минимальными затратами.

**ОПС.** В SCADA-системах основным механизмом, используемым для связи с внешним миром, оставался стандартный механизм DDE (Dynamic Data Exchange) с обменом по внутреннему протоколу (известному только фирме-разработчику). Компания Microsoft взамен механизма DDE предложила более эффективное средство передачи данных между процессами — механизм OLE (Object Linking and Embedding) (включение и встраивание объектов). На базе OLE появился стандарт OPC (OLE for Process OLE) ориентированный на рынок систем управления в промышленности.

**Реальное время для Windows (NT/2000/XP).** Выход в свет Windows NT/2000/XP стимулировал разработку новых подходов в поддержке жесткого реального времени. Тем не менее, Windows NT/2000/XP имеет ряд ограничений: предпочтение аппаратного прерывания программному (даже если это простое движение мыши), при обработке аппаратных прерываний выполнение лишь необходимых действий с последующей обработкой через очередь отложенных процедур, отсутствие приоритетной обработки процессов в очереди отложенных процедур. Все это не позволяет отнести Windows NT/2000/XP к категории классических ОС реального времени.

### 5.3.3. HMI на базе операторских станций

Аппаратно рабочая станция оператора (OS, operator station) представляет собой персональный компьютер. Как правило, станция снабжается несколькими широкоэкранными мониторами, функциональной клавиатурой и необходимыми сетевыми адаптерами для подключения к сетям верхнего уровня (например, на базе Industrial Ethernet). Станция оператора несколько отличается от офисных компьютеров, прежде всего, своим промышленным исполнением и эксплуатационными характеристиками (а также ценой 4000 — 10000 долларов).

Системный блок может быть как настольного исполнения (desktop), так и для монтажа в 19” стойку (rack-mounted). Чаще применяется второй вариант: системный блок монтируется в запираемую стойку для лучшей защищенности и предотвращения несанкционированного доступа.

На станции оператора устанавливается программный пакет визуализации технологического процесса (часто называемый SCADA). Большинство пакетов визуализации работают под управлением операционных систем семейства Windows (Windows NT 4.0, Windows 2000/XP, Windows 2003 Server), что является большим минусом.

Программное обеспечение визуализации призвано выполнять следующие задачи:

1. Отображение технологической информации в удобной для человека графической форме (как правило, в виде интерактивных мнемосхем) – Process Visualization;
2. Отображение аварийных сигнализаций технологического процесса – Alarm Visualization;
3. Архивирование технологических данных (сбор истории процесса) – Historical Archiving;
4. Предоставление оператору возможности манипулировать (управлять) объектами управления – Operator Control.
5. Контроль доступа и протоколирование действий оператора – Access Control and Operator’s Actions Archiving.
6. Автоматизированное составление отчетов за произвольный интервал времени (посменные отчеты, еженедельные, ежемесячные и т.д.) – Automated Reporting.

Как правило, SCADA состоит из двух частей:

1. Среды разработки, где проектировщик рисует и программирует технологические мнемосхемы;
2. Среды исполнения, необходимой для выполнения сконфигури-

рованных мнемосхем в режиме runtime. Фактически это режим повседневной эксплуатации.

Существует две схемы подключения операторских станций к системе управления, а точнее уровню управления. В рамках первой схемы каждая операторская станция подключается к контроллерам уровня управления напрямую или с помощью промежуточного коммутатора (рис. 1). Подключенная таким образом операторская станция работает независимо от других станций сети, и поэтому часто называется одиночной.

Есть и другой вариант. Часто операторские станции подключают к серверу или резервированной паре серверов, а серверы в свою очередь подключаются к промышленным контроллерам. Таким образом, сервер, являясь неким буфером, постоянно считывает данные с контроллера и предоставляет их по запросу рабочим станциям. Станции, подключенные по такой схеме, часто называют клиентами (рис.2).

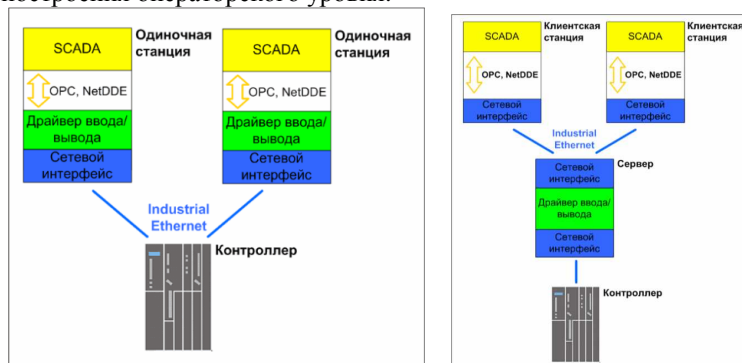


**Рис. 1.** Схема подключения одиночных операторских станций к уровню управления. **Рис. 2.** Клиент-серверная архитектура операторского уровня.

Как происходит информационный обмен? Для сопряжения операторской станции с промышленным контроллером на первой устанавливается специальное ПО, называемое драйвером ввода/вывода. Драйвер ввода/вывода поддерживает совместимый с контроллером коммуникационный протокол и позволяет прикладным программам считывать с контроллера параметры или наоборот записывать в него. Пакет визуализации обращается к драйверу ввода/вывода каждый раз, когда требуется обновление отображаемой информации или запись

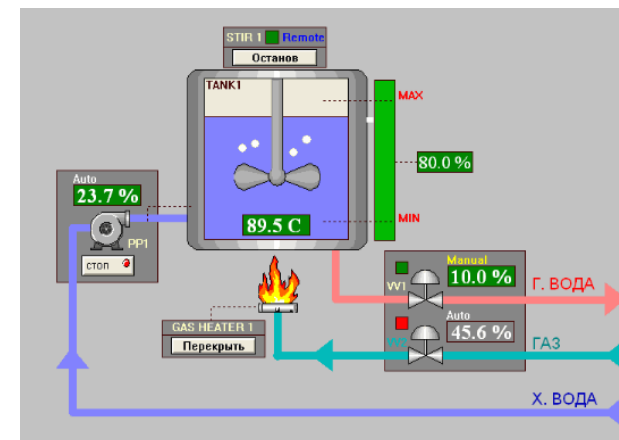


измененных оператором данных. Для взаимодействия пакета визуализации и драйвера ввода/вывода используется несколько протоколов, наиболее популярные из которых OPC (OLE for Process Control) и NetDDE (Network Dynamic Data Exchange). Обобщенно можно сказать, что OPC и NetDDE – это протоколы информационного обмена между различными приложениями, которые могут выполняться как на одном, так и на разных компьютерах. На рисунках 3 и 4 изображено, как взаимодействуют программные компоненты при различных схемах построения операторского уровня.



**Рис. 3.** Схема взаимодействия программных модулей при использовании одиночных станций. **Рис. 4.** Схема взаимодействия программных модулей при использовании клиент-серверной архитектуры.

Как выглядит SCADA? На рисунке 5 изображен упрощенный вариант операторской мнемосхемы для управления процессом. Как видно, резервуар (емкость) наполняется водой. Задача системы — нагреть эту воду до определенной температуры. Для нагрева воды используется газовая горелка. Интенсивность горения регулируется клапаном подачи газа. Также должен быть насос для закачки воды в резервуар и клапан для спуска воды.



**Рис. 5.** Пример операторской мнемосхемы.

На мнемосхеме отображаются основные технологические переменные, такие как: температура воды; уровень воды в резервуаре; работа насосов; состояние клапанов и т. д. Эти данные обновляются на экране с заданной частотой. Если какая-либо переменная достигает аварийного значения, соответствующее поле начинает мигать, привлекая внимание оператора.

Сигналы ввода/вывода и исполнительные механизмы отображаются на мнемосхемах в виде интерактивных графических символов. Каждому типу сигналов и исполнительных механизмов присваивается свой символ: для дискретного сигнала это может быть переключатель, кнопка или лампочка; для аналогового – ползунок, диаграмма или текстовое поле; для моторов и насосов – более сложные фейсплейты (faceplates). Каждый символ, как правило, представляет собой отдельный ActiveX компонент.

Допустим, оператор хочет включить насос. Для этого он кликает на его иконке и вызывает панель управления (faceplate). На этой панели он может выполнить определенные манипуляции: включить или выключить насос, подтвердить аварийную сигнализацию, перевести его в режим «техобслуживания» и т.д. (рис. 6).

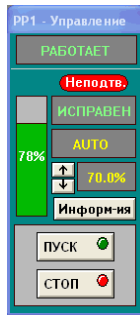


Рис. 6. Пример фейсплейта для управления насосом.

Оператор также может посмотреть график изменения интересующего его технологического параметра, например, за прошедшую неделю. Для этого ему надо вызвать тренд (trend) и выбрать соответствующий параметр для отображения. Пример тренда реального времени показан на рисунке 7.

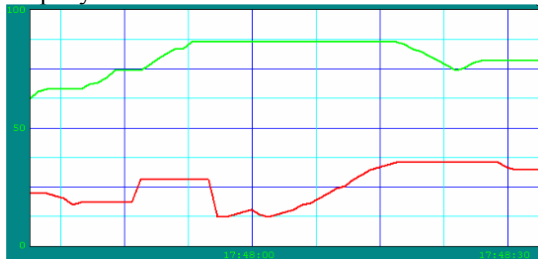


Рис. 7. Пример отображения двух параметров на тренде реального времени.

Для более детального обзора сообщений и аварийных сигнализаций оператор может воспользоваться специальной панелью (alarm panel), пример которой изображен на рисунке 8. Это отсортированный список сигнализаций (alarms), представленный в удобной для восприятия форме. Оператор может подтвердить ту или иную аварийную сигнализацию, применить фильтр или просто ее скрыть.

Time	State	Type	Priority	Name	Group	Value	Limit	Tag Comment
11/15/2008 09:48:51	UNACK	DSC	19	PP1	Tank1	Насос остан.	Насос остан.	Насос P1
11/15/2008 09:48:41	ACK_RTN	DSC	19	PP1	Tank1	Насос пущен	Насос остан.	Насос P1
11/15/2008 09:47:05	ACK_RTN	HI	14	TT1	Tank1	79.4393	85	Темп-ра в Т1
11/15/2008 09:46:58	ACK	HI	14	TT1	Tank1	86.9159	85	Темп-ра в Т1
11/15/2008 09:46:53	UNACK	HI	14	TT1	Tank1	86.9159	85	Темп-ра в Т1
11/15/2008 09:46:46	ACK_RTN	NIHI	19	TLEV1	Tank1	89.7196	95	Уровень в Т1
11/15/2008 09:46:41	UNACK	NIHI	19	TLEV1	Tank1	99.0654	95	Уровень в Т1
11/15/2008 09:46:37	ACK	DSC	19	PP1	Tank1	Насос остан.	Насос остан.	Насос P1
11/15/2008 09:46:21	UNACK	DSC	19	PP1	Tank1	Насос остан.	Насос остан.	Насос P1
11/15/2008 09:46:10	ACK_RTN	DSC	19	PP1	Tank1	Насос пущен	Насос остан.	Насос P1
11/15/2008 09:43:23	ACK_RTN	NIHI	19	TLEV1	Tank1	71.028	95	Уровень в Т1
11/15/2008 09:43:20	ACK_RTN	HI	14	TT1	Tank1	49.5327	85	Темп-ра в Т1

Рис. 8. Панель сообщений и аварийных сигнализаций.

Говоря о SCADA, инженеры часто оперируют таким важным понятием как «тэг» (tag). Тэг является по существу некой переменной программы визуализации и может быть использован как для локального хранения данных внутри программы, так и в качестве ссылки на внешний параметр процесса. Тэги могут быть разных типов, начиная от обычных числовых данных и кончая структурой с множеством полей. Например, один визуализируемый параметр ввода/вывода – это тэг, или функциональный блок PID-регулятора, выполняемый внутри контроллера, — это тоже тэг.

В комплексной прикладной программе может быть несколько тысяч тэгов. Производители SCADA-пакетов это знают и поэтому применяют политику лицензирования на основе количества используемых тэгов. Каждая купленная лицензия жестко ограничивает суммарное количество тэгов, которые можно использовать в программе. Очевидно, чем больше тэгов поддерживает лицензия, тем дороже она стоит; так, например, лицензия на 60000 тэгов может обойтись в 5000 тыс. долларов или даже дороже. В дополнение к этому многие производители SCADA формируют весьма существенную разницу в цене между «голой» средой исполнения и полноценной средой разработки; естественно, последняя с таким же количеством тэгов будет стоить заметно дороже.

### 5.3.4. HMI на базе операторских панелей

HMI на базе рабочих станций оператора обычно устанавливаются централизованно в диспетчерском центре (операторной), охватывающем одну технологическую установку или производственный участок.

Однако зачастую требуется предусмотреть пункты локального управления по месту. Такой подход дает возможность персоналу, работающему в непосредственной близости к технологическому оборудованию, осуществлять эффективный мониторинг процесса и локальное управление.

Современным решением, пришедшим на смену устаревшим кнопочным пультам управления, является использование операторских панелей локального мониторинга и управления (operator panels) (рис. 1).

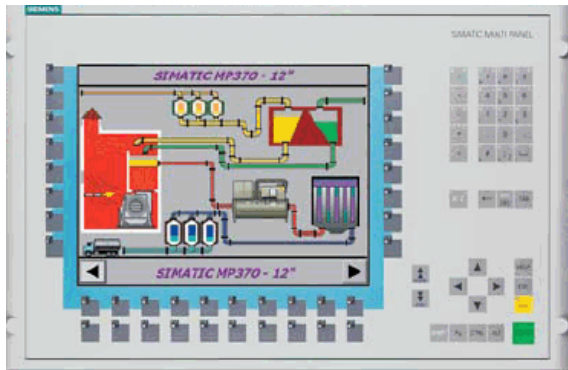


Рис. 1. Панель оператора MP370-12 Keys производства Siemens.

Операторская панель представляет собой компактную вычислительную машину со встроенным жидкокристаллическим дисплеем. Для реализации функций управления панели снабжаются блоками кнопочного управления и/или сенсорными экранами (touch screens).

Типовая панель предоставляет пользователю следующий функционал:

1. Визуализация переменных технологического процесса в текстовом или графическом режимах;
2. Управление и обработка аварийных сообщений, регистрация времени и даты возникновения аварийных сообщений;
3. Ручное управление с помощью функциональных кнопок или сенсорного экрана;

4. Возможность свободного программирования графики и настройки функциональных клавиш;

5. Построение диаграмм и трендов, отображение сводных отчетов.

В графическом режиме визуализация процесса происходит с помощью интерактивных мнемосхем, а в текстовом – в виде строк или специальных таблиц.

Аппаратная архитектура панели устроена по подобию обычных персональных компьютеров, только вместо жесткого диска используется Flash-память. Типовая панель состоит из следующих аппаратных компонентов: 32-разрядный RISC-процессор; оперативная память SDRAM небольшого объема; встроенная Flash-память для хранения операционной системы и накопления пользовательских данных; различные слоты расширения и интерфейсы для подключения программатора и/или сети передачи данных.

Можно выделить следующие важные характеристики панелей оператора:

1. Тип и размер экрана. Экран может быть как монохромным, так и цветным с разрешением от 128x128 до 1024x768.

2. Организация управления. Происходит или с помощью прозрачного сенсорного экрана, наклеиваемого на ЖК-экран, или с помощью функциональных кнопок и манипуляторов, расположенных на фронтальной стороне. Возможен и комбинированный вариант.

3. Количество поддерживаемых сетевых протоколов. Обычно панели имеют встроенную поддержку нескольких коммуникационных протоколов, например, Profibus DP и Industrial Ethernet.

4. Степень защиты. Для фронтальной части – это, как правило, IP65, для остальной части корпуса – IP20. Наибольшее значение имеет степень защиты именно фронтальной части, что связано с особенностью монтажа.

5. Быстродействие процессора и объем встроенной Flash-памяти.

Наиболее часто применяются следующие варианты монтажа операторских панелей:

1. Установка целиком внутри шкафа с прозрачными дверьми;
2. Врезка в дверь шкафа так, чтобы снаружи находилась только фронтальная часть панели (остальная часть корпуса находится внутри шкафа).

На рис. 2 изображены шкафы ввода/вывода, установленные на производстве. Обратите внимание, каждый второй шкаф снабжен панелью оператора, вмонтированной в переднюю дверь.



Рис. 2. Шкафы ввода/вывода с вмонтированными операторскими панелями.

Как подключаются операторские панели? Большинство панелей на подобие тех, что показаны на фотографиях, поддерживают, по меньшей мере, два сетевых протокола: один служит для подключения панели к полевой шине (Profibus, Modbus, A-bus, Interbus и т.д.), другой – для интеграции в сеть верхнего уровня (Industrial Ethernet). На рис. 3 показана одна из возможных схем подключения панели; на практике этот вариант используется наиболее часто.

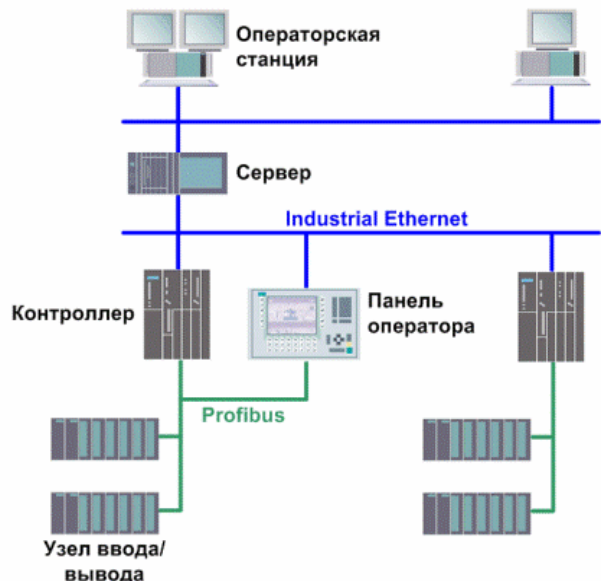


Рис. 3. Схема подключения операторской панели к АСУ ТП.

Для программирования панель подключают к персональному компьютеру или программатору. Чаще всего подключение осуществляется по интерфейсу RS-232 через обычные COM-порты. На компьютере устанавливается специальный программный пакет для конфигурирования НМІ (например, для панели MP370-12 это пакет WinCC Flexible). После того, как разработка НМІ закончена, сконфигурированный проект загружается с компьютера в панель оператора, и на ней можно начинать работать. Стоит отметить, что программное обеспечение для конфигурирования панелей поставляется, как правило, отдельно и стоит немалых денег.

Существует очень элегантное техническое решение, объединяющее функционал панели оператора и возможности промышленного контроллера в одном устройстве. Такие многофункциональные устройства часто называют графическими супервизорами (visual supervisors).

На рис. 4 представлен модельный ряд супервизоров серии Еuson компании Eurotherm. По сути они являются полноценными промышленными контроллерами, которые, помимо типового функционала операторской панели, могут выполнять непрерывное и дискретное регулирование.



Рис. 4. Графические супервизоры Euson производства Eurotherm.

### 5.3.5. Основные механизмы обработки информации в SCADA-системах

#### 5.3.5.1. Визуализация функционирования ОУ на основе мнемосхем

**Назначение.** Мнемосхема (экранная форма) – наглядное графическое изображение технологического процесса, интегрированное со средствами контроля и управления. Она является важнейшим источником информации о характере и структуре связей, текущем состоянии переменных (в том числе связанных с нарушением технологических режимов, авариями и т. п.) и позволяет оператору-технологу:

- облегчить запоминание хода технологического процесса и назначения устройств и органов управления;
- определить способы действия при различных режимах работы объекта;
- способствовать упрощению поиска и опознания нужной информации для оперативного принятия правильных решений.

**Графические компоненты.** Все SCADA-системы имеют в своем составе средства, позволяющие создавать как статические элементы мнемосхем (контурные изображения технологических аппаратов, трубопроводы и т. д.), так и оживлять (анимировать) эти элементы (создавать динамические объекты). В состав этих средств входят:

- наборы графических примитивов рисования (линия, прямоугольник, эллипс, кривые, текст) и средства их компоновки для создания уникальных собственных объектов);
- готовые библиотеки типовых графических объектов: технологические объекты (аппараты, механизмы, машины и т. д.), табло, указатели, ползунки, кнопки, переключатели, служащие для отображения переменных и управления процессом. Данные библиотеки могут быть расширены пользователем.

При построении мнемосхемы вначале осуществляется прорисовка статического изображения рабочего окна. Обычно это аппараты технологического процесса или их технологическая последовательность, трубопроводы, фон, поясняющий текст и т. п.

Следующим шагом является придание мнемосхеме динамики, т. е. анимация нарисованных (или выбранных из библиотек) элементов. Под анимацией понимается способность элементов менять свои свойства при изменении переменных технологического процесса. Изменяемыми свойствами являются толщина, цвет и стиль линии, цвет и

стиль заливки (если это фигура с заполнением), а также размеры, положение и ориентация элементов. Предусматривается также непосредственный ввод переменных (цифрами и текстом, ползунковыми устройствами) и управление процессом с помощью кнопок и переключателей (Пуск/Останов, Включение/Выключение, Вызов Окна и т. д.).

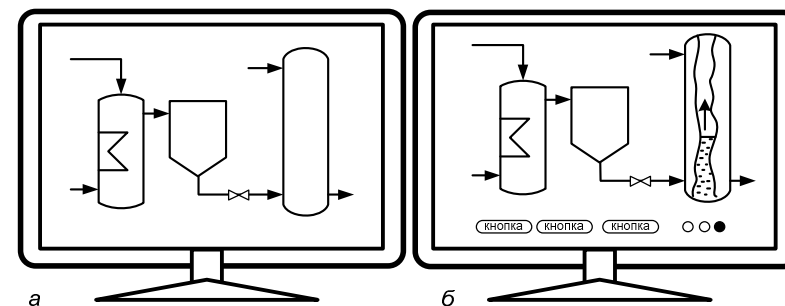


Рис.1. Мнемосхемы: а) статики, б) динамики

**Принципы построения.** При большом разнообразии технологических процессов спроектировать хорошую мнемосхему во многом искусство, но можно рекомендовать общие принципы построения:

– *лаконичность и наглядность* – мнемосхема должна быть простой (контуры и пропорции аппаратов приближены к виду реальных прототипов), не должна содержать второстепенных элементов, а отображаемая информация четкой и конкретной, удобной для восприятия и дальнейшей переработки. Мнемосхема должна предоставлять минимальное, но адекватное для контроля и управления количество переменных, не должна «перегружена» информацией для уточнения (второстепенные тренды), которую удобнее делать вложенной в виде всплывающих окон, вызываемых по требованию оператора;

– *максимальная линейность* изображения процесса, т.е. желательно выделять основную линию процесса, подчиняясь правилу визуальности: чтение «слева направо» и «сверху вниз», минимальное применение параллельных контуров, что значительно упростит восприятие схемы.

– *автономность* – обособление друг от друга участков мнемосхемы, соответствующих автономно контролируемым и управляемым объектам и агрегатам. Эти обособленные участки должны быть четко отделены от других и иметь завершенную, легко запоминающуюся и

отличающуюся от других структуру.

– *унификация* – символы сходных объектов и процессов необходимо по возможности объединять и унифицировать;

– *визуальный акцент к элементам контроля и управления* – В первую очередь должны быть выделены (размерами, формой или цветом) элементы, существенные для оценки состояния, принятия решения и воздействия на управляемый объект (т.е. помогают быстро ориентироваться, определять и устранять отклонения и неисправности);

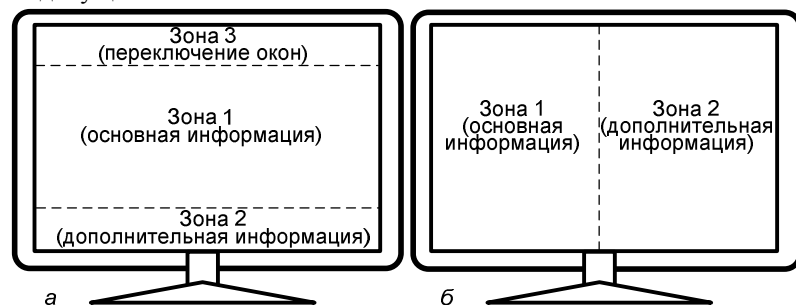
– *учет человеческого фактора* – мнемосхема должна разрабатываться и совершенствоваться с учётом мнения эксплуатирующего персонала.

Для оценки мнемосхем используются:

– коэффициент информативности – отношение числа пассивных (статических) элементов и активных (динамических);

– коэффициент заполнения поля – отношение числа пассивных элементов мнемосхем к общему числу элементов мнемосхемы.

При проектировании мнемосхем предлагают обычно несколько вариантов. Окончательный выбирают путем эксперимента (имитируют на компьютере деятельность оператора с различными вариантами мнемосхемы). Критериями оценки служат время решения задач и число допущенных ошибок.



**Рис.2.** Зоны расположения информации в мнемосхеме: а) горизонтальная доминанта б) вертикальная доминанта

На рис. 2 приведены основные зоны мнемосхемы. При горизонтальной доминанте подачи информации выделяют следующие зоны:

*зона основной информации* – отражает общую структуру технологического процесса. В ней расположены основные аппараты, трубопроводы, а также информационная нагрузка, сопровождающая техно-

логический процесс.

*зона дополнительной информации* – здесь могут располагаться кнопки графиков трендов, отчетов, «пуск/останов» и т. д.

*зона переключения* – обусловлена невозможностью рационального отображения всей информации в одном окне («проклятие формата»). С помощью средств области, возможно вызывать дополнительные окна на которых более подробно детализированы сигнализации, тренды (за день, месяц, год), отдельные участки процесса. Такой подход разгружает мнемосхему, даёт возможность получить нужную информацию о том объекте, которой заслуживает внимания в данный момент.

Явное отличие при вертикальной доминанте зон – область 2 (дополнительной информации) расположена правее области 1 (основной информации). Это связано в первую очередь с размерами описываемых объектов (отображаемый процесс по объёму небольшой), что позволяет отвести больше пространства для поясняющей информации. Данную компоновку областей возможно применять для всплывающих окон, т. е. детального рассмотрения отдельных участков технологического процесса.

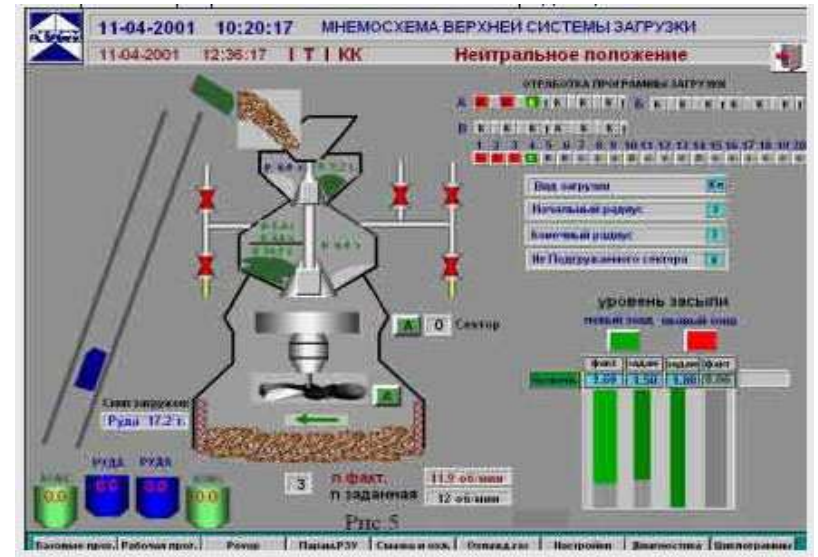
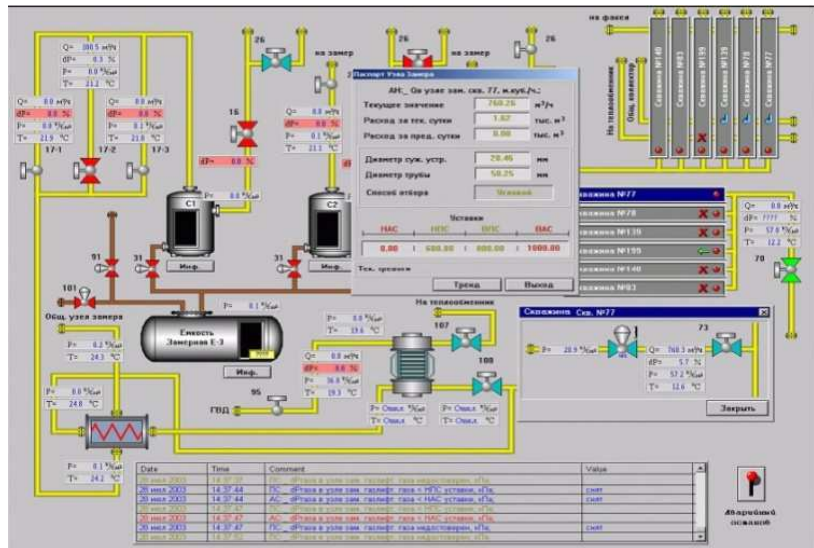
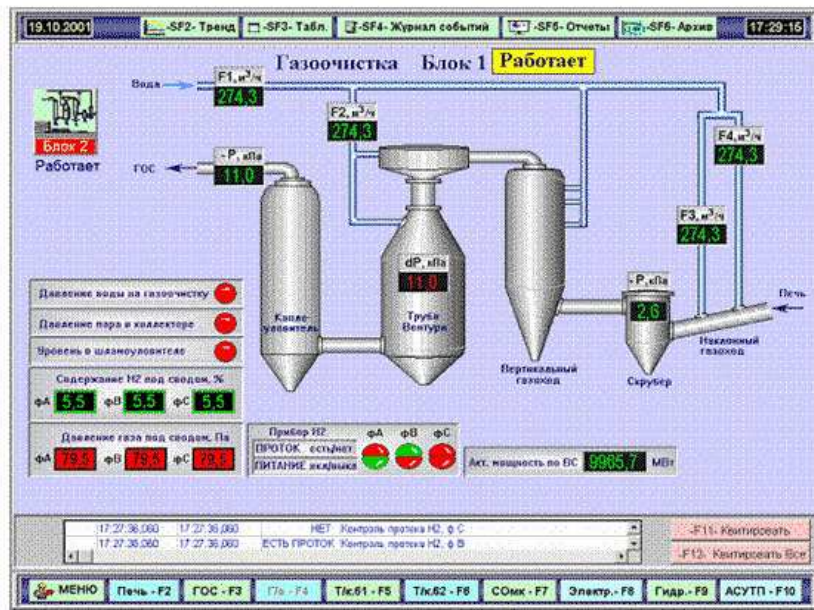


Рис.4. Примеры реальных мнемосхем



### 5.3.5.2. Протоколирование (архивирование) и обработка процессных переменных

Протоколирование (архивирование, на техническом жаргоне «история», history) и обработка процессных переменных позволяет оператору-технологу:

1. оценить динамику изменения технологических переменных за длительный период времени, что полезно для понимания поведения процесса в различных (в том числе аварийных) ситуациях, а, следовательно, и пополнения знаний о конкретной технологии;

2. оценить качество и эффективность управления на основе ретроспективного анализа ключевых технологических (процессных) переменных, что позволяет судить о том, в какой мере достигнута поставленная цель управления;

3. установить причины возникновения различных аварийных и нестандартных ситуаций. Так, изучив журнал аварийных ситуаций, можно определить, какое именно действие привело к отклонению от регламента или аварии.

Процессные переменные – это численные значения переменных (обычно, сигналы ввода/вывода), определяющие текущее состояние технологического процесса. Они делятся на дискретные и аналоговые:

- дискретная переменная принимает конечное число значений из узкого диапазона. На практике под дискретной переменной чаще всего подразумевают величину булевского типа (двоичную), указывающую на одно из двух возможных состояний объекта (или управляющего сигнала), т. е. включено/выключено);
- аналоговая переменная принимает любую величину из ограниченного непрерывного диапазона значений.

Существуют две техники регистрации значений процессных переменных в архиве SCADA-систем:

1. *Циклическая запись* (cyclic archiving) – запись текущего значения процессной переменной через заданные пользователем интервалы времени вне зависимости от величины и скорости изменения данной переменной (рис. 1). Интервал циклической записи для каждой переменной настраивается индивидуально и, как правило, лежит в диапазоне от 0.5 с до 10 мин. Хотя эта техника не очень экономична, она довольно часто используется для архивации аналоговых переменных.

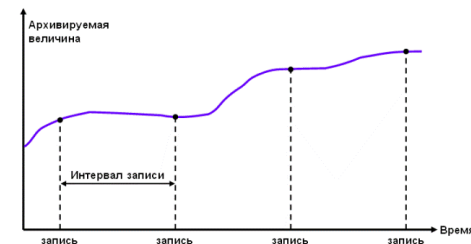


Рис. 1. Циклическая запись процессной переменной в архив

2. *Архивация по изменению переменной* (дельта-архивирование, delta-archiving) – запись переменной в архив только тогда, когда изменение ее значения по сравнению с предыдущим записанным значением (абсолютная разность) достигает определенной величины – дельты (рис. 2). Дельта настраивается пользователем и может быть выражена как в абсолютных единицах измерения, так и в процентах от шкалы. Эта техника более экономична, чем циклическая запись, так как адаптируется к скорости изменения архивируемой величины.

Для дискретных величин – этот подход незаменим. Допустим, у нас есть дискретная переменная, которая изменяется, скажем, раз в час. Зачем же ее архивировать каждую секунду или минуту? Ведь гораздо логичнее записывать значение переменной в архив только в те моменты, когда это значение переходит из 1 в 0 или наоборот.

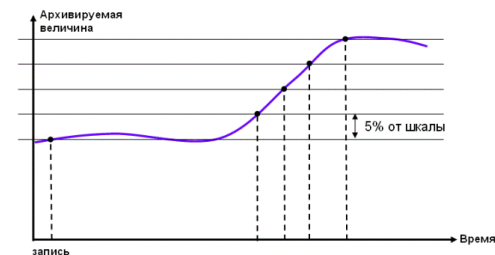


Рис. 2. Дельта-архивирование процессной переменной

Хранить архив в одном большом файле – это не очень хорошо с точки зрения скорости доступа к данным. Поэтому он состоит из множества последовательно создаваемых файлов (система генерирует новый файл архива каждую рабочую смену или сутки).



Существует три варианта записи процессных переменных в архив:

1. в обычный текстовый файл в формате CSV (comma separated values). Преимущество хранения – просмотр любым текстовым редактором, экспорт в MS Excel и просмотр в виде таблицы, применяя необходимые сортировки и фильтры. Недостаток – неэкономичность хранения, т. к. архив занимает много места на жестком диске. Для уменьшения объема архива применяют сжатие по алгоритму ZIP или RAR.

2. в двоичный файл, формат которого зависит от используемого программного обеспечения визуализации технологического процесса (SCADA). Это более экономичное представление архива, однако формат архива у разных производителей SCADA-систем может сильно различаться.

3. в реляционную базу данных с поддержкой СУБД SQL, что позволяет достичь большой скорости работы с архивом (добавление записей, чтение и обработка данных). При этом сервер SQL может обеспечить доступ к архиву сразу нескольким десяткам удаленных клиентов. Поскольку доступ осуществляется по открытому интерфейсу SQL, разработчики имеют возможность создавать клиентские приложения под свои нужды. Но главное преимущество заключается в том, что архив на базе SQL – это отличная возможность для интеграции с информационными системами более высокого уровня (например, уровня MES-систем).

Архив отображают в виде специального динамического (обновляемого автоматически) графика, называемого *трендом* (trend). Тренд помещается на мнемосхемы операторского интерфейса в тех местах, где это необходимо и удобно оператору.

На тренд можно выводить до 16 переменных одновременно, как дискретных, так и аналоговых. При этом тренд можно строить за произвольный промежуток времени (time span). Также поддерживается масштабирование (scaling). Передвигая ползунок (slider) вдоль шкалы времени можно просматривать точные значения переменных в различные моменты времени в прошлом. Отрезки времени, в течение которых наблюдались аварийные значения переменных, выделяются на тренде контрастным цветом.

В общем, тренды – это мощный и очень удобный инструмент для технологов, наглядно показывающий поведение переменных в динамике.

### 5.3.5.3. Протоколирование и обработка особых состояний (тревоги и события), аварийные сигнализации

Характерной особенностью SCADA-систем является встроенный механизм обработки особых состояний (Тревоги и События) с обеспечением их отображения, записи и печати:

- *тревоги* – предупреждения о ненормальном ходе технологического процесса, как правило, требующие немедленной реакции оператора. Типичным примером тревоги является превышение какой-либо переменной (например, температурой) заранее заданного предела (уставки), неожиданное отключение механизма, пропадание давления рабочей жидкости и т.п. Сообщения об этих тревогах передаются оператору, который должен подтвердить факт получения данного сообщения («квитировать» сообщение).
- *события* – информация об изменениях в статусе технологического процесса (например, возврат параметра из аварийного состояния в нормальное) или о действиях обслуживающего персонала (например, регистрация оператора) и не предполагают немедленной реакции оператора.

На основании тревог и событий формируется аварийная сигнализация (alarm) – это оповещение оператора о наступлении определенного состояния, связанного с нарушением или угрозой нарушения регламентного течения технологического процесса.

Аварийные сигнализации настраиваются путем задания предельных значений (границ, thresholds) индивидуально для каждой процессной переменной. Система автоматически отслеживает изменение процессной переменной и сопоставляет ее значение с заранее настроенными границами. В случае выхода переменной за нормальные границы система генерирует оповещение и фиксирует его в журнале аварийных сигнализаций.

Наиболее часто используемые аварийные сигнализации для аналоговых величин:

Lo – нижняя предупредительная граница. В случае если процессная переменная становится меньше Lo, генерируется предупредительное оповещение.

LoLo – нижняя аварийная граница. В случае если процессная переменная становится меньше LoLo, генерируется аварийная сигнализация.

Hi – верхняя предупредительная граница. В случае если про-

цессная переменная становится больше Hi, генерируется предупредительное оповещение.

HiHi – верхняя аварийная граница. В случае если процессная переменная становится больше HiHi, генерируется аварийная сигнализация.

DEV\_HI (DEVIATION\_HI) – верхняя граница отклонения (расхождений) (по отклонению от заданного значения (предупредительное и аварийное)). Если разность (абсолютное значение) между двумя переменными становится больше DEV\_HI, то генерируется аварийная сигнализация. Например, такую сигнализацию можно настроить у блока PID; в этом случае система будет сигнализировать об отклонении регулируемой величины от уставки, превышающем границу DEV\_HI. По аналогии можно настроить сигнализацию DEV\_LO.

ROC\_HI (RATE\_OF\_CHANGE\_HI) – верхняя граница скорости изменения (по скорости изменения переменной). Система отслеживает скорость изменения процессной переменной (первую производную). Если скорость возрастания переменной выше границы ROC\_HI, то генерируется аварийная сигнализация.

Для дискретных переменных сигнализаций гораздо меньше. По сути их всего две – аварийное состояние, соответствующее значению 1, или авария в случае значения 0.

На рис. 1 показана схема появления аварийных сигнализаций на примере быстро изменяющейся процессной переменной. Стоит отметить, что на рисунке изображены отнюдь не все генерируемые оповещения. Например, при возврате переменной обратно в нормальный диапазон значений, кроме изображенных на рисунке, генерируется оповещение RETURN\_TO\_NORMAL.

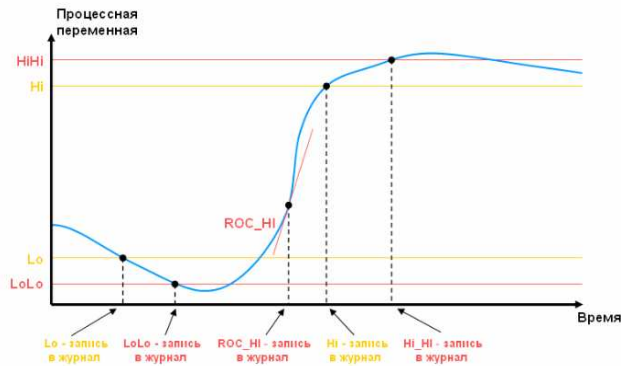


Рис. 1. Пример генерации аварийных сигнализаций и оповещений.

Важность (или критичность) аварийной сигнализации определяется приоритетом (целое число). Как правило, чем выше приоритет у аварийной сигнализации, тем критичнее она для производства, и тем быстрее на нее надо обратить внимание.

При появлении аварийной сигнализации у оператора есть два варианта действий:

1. Игнорировать ее. Не всегда хорошее решение, мягко говоря. При этом если процессная переменная вернется обратно в нормальные границы, то появится новое оповещение UNACK\_RETURN\_TO\_NORMAL, говорящее о том, что оператор проспал аварийное событие, но, к счастью, все нормализовалось.

2. Подтвердить, что сигнализация замечена оператором (acknowledge). Дело в том, что сразу после появления аварийной сигнализации ей автоматически присваивается статус UNACK (не подтверждена). Как только сигнализацию подтверждают (иногда говорят «квитируют»), ее статус становится ACK (подтверждена). В этом случае возврат переменной в нормальные границы ведет к появлению оповещения ACK\_RETURN\_TO\_NORMAL, свидетельствующее о том, что оператор «держит ухо остро».

Аварийные сигнализации и оповещения регистрируются сразу после их появления в специальном архиве – журнале аварийных сигнализаций (alarm journal, alarm list). Он представляет собой базу данных SQL, которую разворачивают либо на операторских станциях, либо на сервере (если таковой предусмотрен). Его самое понятное

отображение – это в показ в виде отсортированной по времени и автоматически обновляемой таблицы (рис. 2, 3).

Time	State	Type	Priority	Name	Group	Value	Limit	Tag Comment
11/15/2008 09:48:51	UNACK	DSC	19	PPI Tank1	Насос останов.	Насос останов.	Насос P1	
11/15/2008 09:48:41	ACK_RTN	DSC	19	PPI Tank1	Насос пущен	Насос останов.	Насос P1	
11/15/2008 09:47:05	ACK_RTIN	HI	14	TT1 Tank1	79.4393	85	Темпра в Т1	
11/15/2008 09:46:58	ACK	HI	14	TT1 Tank1	86.9159	85	Темпра в Т1	
11/15/2008 09:46:53	UNACK	HI	14	TT1 Tank1	86.9159	85	Темпра в Т1	
11/15/2008 09:46:46	ACK_RTIN	HIHI	19	TLEVI Tank1	89.7196	95	Уровень в Т1	
11/15/2008 09:46:41	UNACK	HIHI	19	TLEVI Tank1	99.0654	95	Уровень в Т1	
11/15/2008 09:46:37	ACK	DSC	19	PPI Tank1	Насос останов.	Насос останов.	Насос P1	
11/15/2008 09:46:21	UNACK	DSC	19	PPI Tank1	Насос останов.	Насос останов.	Насос P1	
11/15/2008 09:46:10	ACK_RTIN	DSC	19	PPI Tank1	Насос пущен	Насос останов.	Насос P1	
11/15/2008 09:43:23	ACK_RTIN	HIHI	19	TLEVI Tank1	71.028	95	Уровень в Т1	
11/15/2008 09:43:20	ACK_RTIN	HI	14	TT1 Tank1	49.5327	85	Темпра в Т1	

Рис. 2. Пример журнала аварийных сигнализаций пакета Wonderware Intouch.

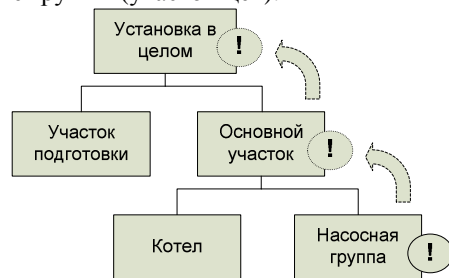
Кроме того, поддерживается фильтрация и сортировка аварийных сигнализации, их квитирование (подтверждение), а также возможны операции как с отдельными записями таблицы, так и с пользовательскими группами (например, группировка по различным технологическим участкам и установкам).

Рис. 3. Пример журнала аварийных сигнализаций пакета Simatic WinCC.

Совершенно очевидно, что различные тревоги имеют различную степень опасности – превышение давления в котле может вызвать взрыв, в то время как превышение уровня воды может вызвать только протечку. Поэтому каждой конкретной тревоге присваивается приоритет, определяющий ее опасность. Далее по этому приоритету можно фильтровать тревоги, например, при появлении наиболее опасных – включать сирену, а по менее опасным – только менять цвет соответ-

ствующего объекта или выдавать текстовое сообщение. Другим способом фильтрации тревог может быть вывод их на различные табло (на различные рабочие места).

Важной особенностью обработки тревог является возможность объединения их в иерархически построенные группы (рис. 4). Группы должны назначаться в соответствии с технологической схемой процесса, например цех-участки-установки. При этом тревога, возникшая на нижнем уровне иерархии (на установке), возбудит соответствующие вышележащие группы (участок-цех).



**Рис. 4.** Пример организации тревог для установки по группам. В этом случае при возникновении тревоги в насосной группе автоматически перейдут в режим тревоги основной участок и установка в целом

#### 5.3.5.4. Действия операторов-технологов

Для технолога-оператора механизмы обработки информации в SCADA-системах (визуализация, протоколирование и обработка) сфокусированы в ведении электронного журнала. В нем регистрируются следующие действия оператора, выполняемые на операторской станции SCADA-системы:

1. Вход/выход из системы (system logon/logout);
2. Квитирование (подтверждение) аварийных сигнализаций (alarm acknowledgment);
3. Изменение процессных переменных (variable changes) – например, уставки  $u_{зад}$ , верхней или нижней границы технологического диапазона);
4. Изменение настроек системы, если это допускается (tuning);

Журнал записывается в базу данных SQL и может храниться как на операторской станции, так и централизованно на сервере (например, на том же, где хранится архив аварийных сигнализаций). Журнал оператора отображается в табличной форме и по виду похож на журнал аварийных сигнализаций. В нем, как минимум, показывается:

1. Имя оператора;
2. Права или уровень доступа оператора;
3. Дата и время совершения действия;
4. Тип совершенного действия (например, изменение уставки температуры с  $34.5^{\circ}\text{C}$  на  $35.0^{\circ}\text{C}$ , остановка насоса и т. д.);
5. Комментарий оператора (при необходимости).

В некоторых системах журнал действий оператора и журнал аварийных сигнализаций хранятся в одной базе данных и отображаются в единой форме. Это связано с тем, что в обоих случаях в основе регистрации лежит событийный подход.

### 5.3.6. Архитектура системы архивирования

Для работы с базами данных истории в большинстве систем управления используются СУБД MS SQL Server или MySQL (Oracle). Наиболее часто применяются следующие схемы архивирования:

1. Каждая операторская станция накапливает на своем жестком диске собственный архив (или определенную часть архива) независимо от работы других станций. При этом станция имеет доступ как к своему архиву, так и к архиву, хранящемуся на соседней станции. Как правило, на каждой операторской станции устанавливается СУБД на базе SQL для ведения журнала аварийных сигнализаций и журнала действий оператора. Во многих системах архив процессных переменных также записывается в локальную базу данных и обслуживается движком на базе SQL. При такой схеме архивы, хранящиеся на разных станциях, не синхронизируются и поэтому могут значительно отличаться друг от друга. Такая организация архивирования больше характерна для систем с одиночными операторскими станциями (рис. 7).

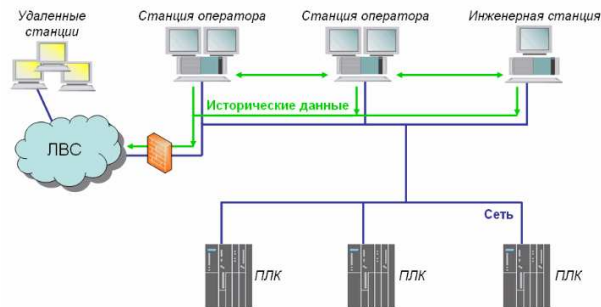


Рис. 7. Система архивирования при одиночных операторских станциях

2. При клиент-серверной архитектуре операторского уровня (рис. 8) история накапливается и хранится на общем сервере. В случае использования резервированной пары серверов система обеспечивает идентичность хранящихся на них экземпляров архива, проводя их периодическую синхронизацию. Операторские станции получают по запросу архивные данные от общего сервера (или серверов). Работа с архивами организуется с помощью СУБД на базе SQL.

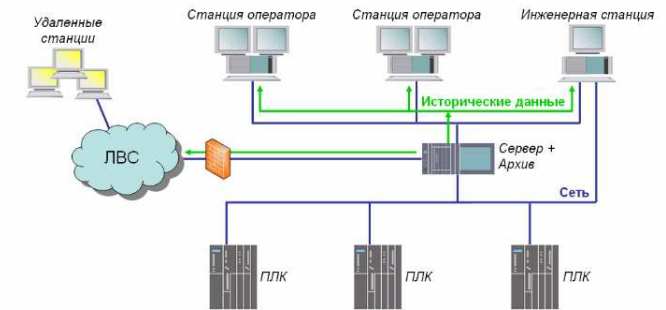


Рис. 8. Система архивирования при клиент-серверной архитектуре

3. Для долговременного хранения истории часто выделяют отдельный центральный сервер архива (central archive server, CAS) (рис. 9). Как правило, это мощная серверная платформа с дисками большой емкости или даже RAID-массивом. Главное предназначение CAS – это сбор и хранение технологической истории в течение нескольких лет. CAS берет исторические данные с общего сервера, обеспечивает их хранения и поставляет их операторским станциям (как, впрочем, и любому другому обратившемуся к ним клиенту). Такая схема архивирования позволяет освободить общий сервер и операторские станции от такой ресурсоемкой задачи как сбор истории. В некоторых системах сервер CAS резервируется.

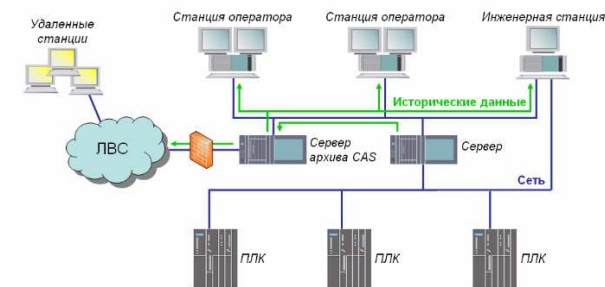


Рис. 9. Система архивирования на базе сервера CAS

Система архивирования должна отвечать следующим требованиям:

1. Большая глубина (продолжительность) архива. Выражается в способности непрерывного архивирования технологических переменных в течение нескольких лет. Архив накапливается в виде последовательно создаваемых частей определенного размера. Когда суммарный размер всех частей достигает угрожающего размера, система автоматически пересылает самые старые части на Backup-сервер или осуществляет их запись на съемный накопитель, тем самым высвобождая место под новые.

2. Производительность (скорость архивирования) и максимальное количество архивируемых переменных. Это достигается путем модификации стандартной СУБД (например, надстройки над SQL-сервером), что позволяет добиться более высокой скорости работы с базой данных, чем в обычных офисных приложениях. Например, продукт Wonderware Industrial SQL Server версии 9.0 позволяет записывать до 2000 аналоговых переменных в секунду и поддерживает в сумме до 60000 переменных, а система SIMATIC PCS7 Central Archive Server – до 120000 переменных.

3. Поддержка открытых коммуникационных протоколов. Доступ к архиву со стороны клиентов должен быть возможен с использованием стандартных, всем известных протоколов (например, OPC) или с использованием SQL-запросов. Это требование связано с тем, что архивом пользуются не только операторские станции, входящие непосредственно в состав SCADA-систем, но и сторонние пользователи такие как: удаленные клиенты, серверы приложений MES-систем (рабочая станция начальника цеха) и т. д.

## 5.4. MES-системы

### 5.4.1. Назначение и типовые функции

MES (manufacturing execution systems) — это «производственная исполнительная система». Международная ассоциация MESA предлагает следующее определение MES: «Система, состоящая из набора программных и аппаратных средств, обеспечивающих функции управления производственной деятельностью: от заказа на изготовление партии продукции и до завершения производства».

В самом обобщенном понимании MES-система:

- инициирует производственный процесс;
- следит за тем, как он проходит в реальном времени;
- реагирует на изменяющуюся в производстве ситуацию;
- составляет отчеты о производственных процессах по мере их протекания в реальном времени;
- обменивается информацией о цеховых процессах с другими инженерными и бизнес-подразделениями предприятия.

Ассоциация MESA выделила 11 основных функций, которые определяют место MES-систем в автоматизированной системе управления промышленным предприятием:

1. *Контроль состояния и распределение ресурсов (RAS)* – обеспечивает управление ресурсами производства (машинами, инструментальными средствами, методиками работ, материалами, оборудованием) и другими объектами, например, документами о порядке выполнения каждой производственной операции. В рамках этой функции описывается детальная история ресурсов и гарантируется правильность настройки оборудования в производственном процессе, а также отслеживается состояние оборудования в режиме реального времени.

2. *Оперативное/Детальное планирование (ODS)* – обеспечивает оперативное и детальное планирование работы, основанное на приоритетах, атрибутах, характеристиках и свойствах конкретного вида продукции, а также детально и оптимально вычисляет загрузку оборудования при работе конкретной смены.

3. *Диспетчеризация производства (DPU)* – обеспечивает текущий мониторинг и диспетчеризацию процесса производства, отслеживая выполнение операций, занятость оборудования и людей, выполнение заказов, объемов, партий и контролирует в реальном времени выполнение работ в соответствии с планом. В режиме реального времени отслеживаются все происходящие изменения и вносятся корректиров-

ки в план цеха.

4. *Управление документами (DOC)* – контролирует содержание и прохождение документов, которые должны сопровождать выпускаемое изделие (включая инструкции и нормативы работ, способы выполнения, чертежи, процедуры стандартных операций, программы обработки деталей, записи партий продукции, сообщения о технических изменениях, передачу информации от смены к смене), а также обеспечивает возможность вести плановую и отчетную цеховую документацию. Предусматривается архивирование информации.

5. *Сбор и хранение данных (DCA)* – обеспечивает информационное взаимодействие различных производственных подсистем для получения, накопления и передачи технологических и управляющих данных, циркулирующих в производственной среде предприятия. Данные о ходе производства могут вводиться как вручную персоналом, так и автоматически с заданной периодичностью непосредственно с производственных линий.

6. *Управление персоналом (LM)* – предоставляет информацию о персонале с заданной периодичностью, включая отчеты о времени и присутствии на рабочем месте, слежение за соответствием сертификации, а также возможность учитывать и контролировать основные, дополнительные и совмещаемые обязанности персонала, такие как выполнение подготовительных операций, расширение зоны работы.

7. *Управление качеством продукции (QM)* – предоставляет данные измерений о качестве продукции, в том числе и в режиме реального времени, собранные с производственного уровня, обеспечивая должный контроль качества и заостряя внимание на критических точках. Может предложить действия по исправлению ситуации в данной точке на основе анализа корреляционных зависимостей и статистических данных причинно-следственных связей контролируемых событий.

8. *Управление производственными процессами (PM)* – отслеживает заданный производственный процесс, а также автоматически вносит корректировку или предлагает соответствующее решение оператору для исправления или повышения качества текущих работ.

9. *Управление производственными фондами (техобслуживание) (MM)* – поддерживает процесс технического обслуживания, планового и оперативного ремонта производственного и технологического оборудования и инструментов в течение всего производственного процесса.

10. *Отслеживание истории продукта (PTG)* – предоставляет информацию о том, где и в каком порядке велась работа с данной про-

дукцией. Информация о состоянии может включать в себя: отчет о персонале, работающем с этим видом продукции, компоненты продукции, материалы от поставщика, партию, серийный номер, текущие условия производства, несоответствия установленным нормам, индивидуальный технологический паспорт изделия.

11. *Анализ производительности (РА)* – предоставляет отчеты о реальных результатах производственных операций, а также сравнивает с предыдущими и ожидаемыми результатами. Представленные отчеты могут включать в себя такие измерения, как использование ресурсов, наличие ресурсов, время цикла производственного ресурса, соответствие плану, стандартам и другие.

Несмотря на кажущееся многообразие функций MES все они имеют оперативный характер и регламентируют соответствующие требования не к предприятию в целом, а к той его единице – цеху, для которого ведется планирование работ.

Основными функциями MES-систем из перечисленных выше являются

- оперативно-календарное (детальное) планирование (ODS);
- диспетчеризация производственных процессов в цеху (DPU).

Именно эти две функции определяют MES-систему как систему оперативного характера, нацеленную на формирование расписаний работы оборудования и оперативное управление производственными процессами в цеху.



#### 5.4.2. Оперативно-календарное (детальное) планирование

MES-система получает объем работ, который либо представлен ERP на этапе объемно-календарного планирования, либо выдается APS-системой в виде допустимого для предприятия план-графика работы цеха, и в дальнейшем сама не только строит более точные расписания для оборудования, но и в оперативном режиме отслеживает их выполнение. Различия в функциях планирования ERP, APS и MES-систем представлены на рис. 3.1.

Цель планирования MES-системы – не только выполнить заданный объем с указанными сроками выполнения тех или иных заказов, но выполнить как можно лучше с точки зрения экономических показателей цеха.

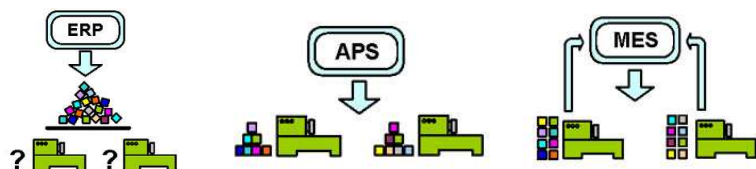


Рис. 3.1. Различия в функциях планирования ERP, APS и MES-систем

APS-системы формируют некие исходные расписания работы первой степени приближения еще до начала реализации производственных планов. При этом, ввиду большой размерности задачи, не учитываются многие технологические и организационные факторы. MES система уже на этапе выполнения, получая такой предварительный план, оптимизирует его по ряду критериев.

При этом, после оптимизации и построения нового план-графика работы цеха, очень часто за счет уплотнения работы оборудования, отыскиваются дополнительные резервы, появляется возможность в рамках планируемого периода выполнить дополнительные заказы. Тем самым достигается эффект увеличения пропускной способности производственных структур.

В отличие от APS-систем, MES-системы оперируют меньшими размерностями назначения – до 200 станков и 10000 операций на горизонте планирования, который обычно составляет не более трех-десяти смен. Уменьшение размерности связано с тем, что в MES учитывается гораздо большее количество ограничений технологического

характера.

Еще одним отличием является то, что MES-системы обычно оперируют не одним или двумя критериями построения расписания, а, зачастую, несколькими десятками, что дает возможность диспетчеру цеха строить расписание с учетом различных производственных ситуаций. И только MES-системы оперируют так называемыми векторными, интегральными критериями построения расписаний, когда в один критерий собираются несколько частных критериев.

При этом диспетчер, составляя расписание, может указать, что он хочет видеть в конкретном расписании: уменьшение календарной длительности выполнения всего задания, уменьшение длительности операций переналадок, высвобождение станков, имеющих небольшую загрузку и т.п. Оперативность составления и пересчета расписания является также прерогативой MES, поскольку пересчет может вестись с дискретой в одну минуту. Это не означает, конечно же, что каждую минуту рабочему будут выдаваться новые задания, но это означает, что все процессы в цеху контролируются в режиме реального времени и это позволяет заранее предвидеть все возможные нарушения расписаний и вовремя принимать соответствующие меры.

Алгоритмы MES-систем, хотя и базируются, в большинстве случаев, на эвристике, но, как правило, значительно сложнее и «умнее» алгоритмов APS. Вначале алгоритм MES находит допустимое решение с учетом всех ограничений и выбранного критерия (частного или интегрального). В дальнейшем на этапе оптимизации происходит поиск лучшего расписания.

Конечно, полученное расписание также не является оптимальным в полном смысле слова, поскольку поиск оптимума в таких задачах всегда сопровождается со значительными временными затратами (MES-системы строят расписания за 0,1–5 мин.), но полученные при этом расписания, как правило, уже намного ближе к оптимуму, нежели расписания, построенные APS-системами.

В ряде случаев MES-системы могут составлять расписания не только для станков, но также для транспортных средств и обслуживающих устройств, а также бригад наладчиков.

Важным свойством MES-систем является выполнимость расписаний. Встроенные в планирующий контур ERP, APS-системы составляют производственные расписания только в случае внесения в портфель заказов новых изделий или работ; корректировать их в режиме реального времени крайне сложно, что приводит к серьезным проблемам использования APS-систем в мелкосерийном производстве. MES-

системы в таких случаях работают более гибко и оперативно, пересчитывая и корректируя расписания при любых отклонениях производственных процессов, что повышает гибкость и динамичность производства. Если расписания APS-системы больше подходят для производств с крупносерийным характером выпуска продукции, где резких отклонений от производственной программы, как правило, не бывает (устойчивый характер производства), то MES-системы являются незаменимыми в мелкосерийном и позаказном производстве.

При этом если для APS-систем цех с большим объемом технологической и оперативной информации является в какой-то мере «черным ящиком», то MES-системы при выполнении заданий опираются на принцип расчета и коррекции производственных расписаний по фактическому состоянию производства. Эти системы достаточно чутко реагируют на отклонения во времени выполнения технологических операций, на непредвиденный выход из строя оборудования, на появление брака в процессе обработки изделий и другие возмущения внутреннего характера.

В отличие от систем классов ERP и APS, MES-системы являются предметно-ориентированными: для химической технологии, деревообработки, полиграфии и т.д. Поэтому они максимально полно отражают особенности технологии конкретных производственных процессов и зачастую включают в себя развитые средства поддержки технологической подготовки того или иного типа производства.

### 5.4.3. Диспетчеризация производственных процессов в цеху

Любой план только тогда может называться планом, если он выполнен в реальной ситуации. Основой MES для дискретного производства являются два модуля – ODS (оперативное/детальное планирование) и DPU (диспетчеризация производства).

Точность времени рождается в деталях, — если каждая запланированная работа будет выполнена в срок, то и весь план работы большого предприятия тоже будет осуществим. Но зачем нужна такая минутная или секундная точность расписания, если масса субъективных факторов на отдельных рабочих местах может свести на нет результаты любого расчета?

Без обратной связи, без контура диспетчеризации ни одно расписание, как бы точно оно не было построено, невыполнимо. Модули ODS и DPU – это основа точности выполнения всех запланированных процессов. Если убрать модуль ODS, то невозможно будет понять что же надо изготавливать в тот или иной момент времени, а если убрать модуль DPU, то станет ясно, что ODS бесполезна как таковая, уже после первой незапланированной остановки станка. Поэтому в MES-системах модули ODS и DPU органично связаны между собой и представляют единую систему исполнения задуманного.

В MES-системах функция DPU реализована в виде специального модуля диспетчерования, с которым работает диспетчер. Задачей диспетчера является фиксация всех событий в производственной системе: моментов действительного окончания обработки партий деталей, отказов оборудования по различным причинам, любых опережений и запаздываний тех или иных процессов и т.п. (рис. 3.2.).

Все эти события вводятся диспетчером, обычно, вручную, по мере поступления к нему новой информации о состоянии производственных процессов в цеху.

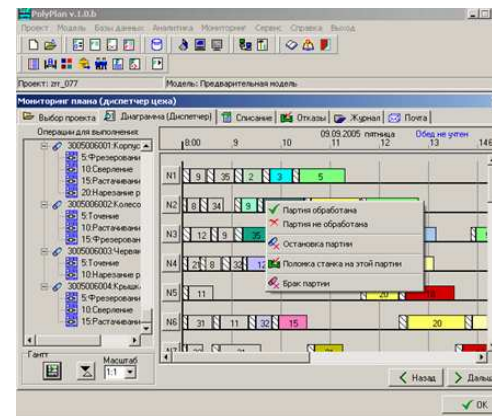


Рис. 3.2. Контур диспетчерования MES-системы PolyPlan

Далее MES-система, с определенным интервалом времени, автоматически анализирует информацию, полученную с диспетчерских терминалов, и если фактическое состояние дел существенно расходится с плановым заданием (изменяются моменты окончания обработки партий деталей), то диспетчер оповещается системой о наличии данных расхождений.

При этом диспетчеру предлагаются варианты таких решений:

- временной сдвиг моментов окончаний некоторых работ с последующим оповещением;
- пересчет расписаний (при существенных расхождениях плана с фактом);
- приостановка работы тех или иных рабочих центров (РЦ);
- изменение приоритетов запуска тех или иных партий деталей и т.п.

После принятия решения диспетчером, а это, чаще всего, либо временной сдвиг работ, либо пересчет расписания, скорректированное расписание вновь вступает в работу с обязательным оповещением на те РЦ, которых затронули коррективы.

Какова оперативность внесения информации по ходу технологических процессов, кто и как будет оповещать диспетчера обо всех событиях, какое оборудование для этого нужно?

Оперативность внесения информации – «как только». Как только она появилась у диспетчера, он обязан ее внести. Потеря двух-трех и более минут при передаче информации с РЦ диспетчеру особого зна-

чения не имеет, поскольку процесс диспетчирования непрерывен и если в какой-то момент времени «пропало» несколько минут, они обязательно обнаружатся в следующий момент времени.

MES-системы, как правило, через каждые пять минут автоматически сканируют входящую информацию о состоянии материальных потоков и станочной системы. Но это не означает, что каждые пять минут план будет пересматриваться, т.к. коррекции подлежит лишь существенное расхождение плана с его фактическим выполнением, что при нормальном протекании процессов — маловероятно.

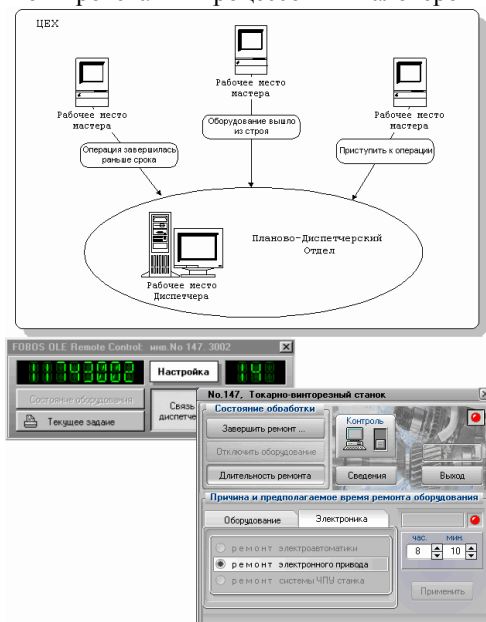


Рис. 3.3. АРМ мастера MES-системы

Процедура оповещение диспетчера о событиях может быть реализована различными способами – обходом РЦ, сообщениями от рабочих данных РЦ или контролеров, принявших партию обработанных деталей, как устно, так и с помощью средств автоматизации (начиная от сообщений по локальной сети и заканчивая обычной «кнопочной» сигнализацией) вплоть до АРМ мастера (рис. 3.3). Главное – вовремя передать информацию и оповестить диспетчера.

## 5.5. ERP-системы

### 5.5.1. Концепции MRP, MRP-2

На предприятиях со сложным многономенклатурным производством, была основной задачей является расчет материальных потребностей на производственную программу.

Ее решение состоит в определении и передаче в производство и службы материально-технического снабжения информации о потребностях предприятия во всех материальных ресурсах (деталях и сборочных единицах собственного производства, полуфабрикатах, материалах, покупных изделиях, оснастке и приспособлениях и т. п.), необходимых для выполнения производственной программы. Особую сложность задаче придает ее календарный характер, т.е. все потребности необходимо привязать к требуемым датам выполнения заказов.

Ранние системы, решавшие эту задачу, получили название MRP (Material Requirements Planning — «Планирование материальных потребностей»). Постепенно был совершен переход от автоматизации управления производством на уровне локальных задач к интегрированным системам, охватывающим выполнение всех функций управления производством. Итогом этого процесса явились системы, получившие название MRP-2 (Manufacturing Resource Planning — «Планирование производственных ресурсов»).

Методология MRP-2 обеспечивает решение задач планирования деятельности предприятия в натуральном и денежном выражении, моделирование возможностей предприятия, отвечая на вопросы типа «Что будет, если..?».

Структура MRP-2 охватывает все основные функции планирования производства сверху вниз и базируется на ряде крупных взаимосвязанных функциональных модулей, среди которых:

- бизнес-планирование (Business Planning — BP);
- планирование продаж и деятельности предприятия в целом (Sales and Operations Planning — S&OP);
- планирование производства (Production Planning — PP);
- формирование графика выпуска продукции (Master Production Scheduling — MPS);
- планирование потребностей в материальных ресурсах (Material Requirements Planning — MRP);
- планирование производственных мощностей (Capacity Requirements Planning — CRP);
- системы оперативного управления производством (среди них

системы, основанные на составлении расписаний работ на цеховом уровне (Shop Floor Control — SFC) и системы поточного производства типа «точно-в-срок» (Just-in-Time — JIT)).

Структура MRP-2 представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Структура системы управления MRP-2

Состав функциональных модулей и их взаимосвязи обеспечивают интеграцию функций планирования, в том числе согласование их при различиях времени и пространства.

Для каждого уровня планирования MRP-2 характерны такие параметры, как степень детализации плана, горизонт планирования, вид условий и ограничений. Для одного и того же уровня планирования MRP-2 эти параметры могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от характера производственного процесса, возможно также применение на каждом отдельном предприятии определенного набора функциональных модулей MRP-2.

Ниже приводится краткая характеристика функциональных модулей MRP-2.

**Бизнес-планирование.** Процесс формирования плана предпри-

ятия наиболее высокого уровня. Планирование долгосрочное, план составляется в стоимостном выражении. Наименее формализованный процесс выработки решений.

**Планирование продаж и деятельности предприятия в целом.** Бизнес-план преобразуется в планы продаж основных видов продукции (как правило, от 5 до 10). При этом производственные мощности могут не учитываться или учитываться укрупненно. План носит среднесрочный характер.

**Планирование производства.** План продаж по видам продукции (семейства однородной продукции) преобразуется в объемный или объемно-календарный план производства видов продукции. В этом плане впервые в качестве планово-учетных единиц выступают изделия, но представления о них носят усредненный характер. Например, речь может идти обо всех легковых переднеприводных автомобилях, выпускаемых на заводе, без уточнения моделей. Часто этот модуль объединяется с предыдущим.

**Формирование графика выпуска продукции.** План производства преобразуется в график выпуска продукции. Как правило, это среднесрочный объемно-календарный план, задающий количества конкретных изделий (или партий) со сроками их изготовления.

**Планирование потребностей в материальных ресурсах.** В ходе планирования на этом уровне определяются, в количественном выражении и по срокам, потребности в материальных ресурсах, необходимых для обеспечения графика выпуска продукции.

**Планирование производственных мощностей.** Как правило, в этом модуле выполняются расчеты по определению и сравнению располагаемых и потребных производственных мощностей. С небольшими изменениями этот модуль может применяться не только для производственных мощностей, но и для других видов производственных ресурсов, способных повлиять на пропускную способность предприятия. Подобные расчеты, как правило, производятся после формирования планов практически всех предыдущих уровней с целью повышения надежности системы планирования. Иногда решение данной задачи включают в модуль соответствующего уровня.

**Оперативное управление производством.** Здесь формируются оперативные планы-графики. В качестве планово-учетных единиц могут выступать детали (партии), сборочные единицы глубокого уровня, детали-(партии) операции и т. п. Период, охватываемый планированием, невелик (от нескольких дней до месяца).

Связь между уровнями в MRP-2 обеспечивается с помощью уни-

версальной формулы: задача планирования на каждом уровне реализуется как ответ на три вопроса:

1. Что необходимо выполнить?
2. Что необходимо для этого?
3. Что имеется в настоящее время?

В качестве ответа на первый вопрос всегда выступает план более высокого уровня. Этим и обеспечивается связь между уровнями. Структура ответов на последующие вопросы зависит от решаемой задачи.

Дальнейшее развитие MRP-2 связано с появлением систем управления предприятием в замкнутом контуре, т. е. с обратной связью. В этих системах появляются такие функциональные возможности, как планирование и учет запуска-выпуска, составление оперативных расписаний, решение задач первичного учета. Перечисленные функциональные возможности не только углубили систему планирования, но и создали условия для эффективного регулирования хода производства, что в конечном итоге способствовало повышению устойчивости планов верхнего уровня. Сегодня под системами типа MRP-2, как правило, подразумевают именно системы с обратной связью.

Существует несколько направлений развития MRP-2.

Первое из них — дополнение MRP-2 функциями управления материальными ресурсами в распределительных системах. Эти функции получили название «Планирование потребностей в распределительных системах» (Distribution Requirements Planning — DRP). Здесь решаются задачи управления запасами в складской сети. Развитие DRP постепенно привело к замене традиционного подхода к определению уровня запасов по принципу «точки заказа» (т. е. подачи заказа на пополнение запасов при достижении минимально допустимого уровня) новым подходом, который основан на определении потребностей в зависимости от заказов на продукцию. Этот подход сегодня распространяется на склады всех уровней — от региональных, оптовых до складов на предприятиях. Такой подход называется планированием зависимых потребностей.

Длительный процесс внедрения MRP-2 позволил, с одной стороны, достичь роста эффективности предприятий, а с другой стороны, выявил ряд присущих этой системе недостатков, в числе которых:

— ориентация системы управления предприятием исключительно на имеющиеся заказы, что затрудняло принятие решений на длительную, среднесрочную, а в ряде случаев и на краткосрочную перспективу;

— слабая интеграция с системами проектирования и конструирования продукции, что особенно важно для предприятий, производящих сложную продукцию;

— слабая интеграция с системами проектирования технологических процессов и автоматизации производства;

— недостаточное насыщение системы управления функциями управления затратами;

— отсутствие интеграции с процессами управления финансами и кадрами.

### 5.5.2. Концепция ERP

Необходимость устранить недостатки систем MRP-2 побудила трансформировать их в системы нового класса — «Планирование ресурсов предприятия» (Enterprise Resource Planning — ERP). Системы этого класса в большей степени ориентированы на работу с финансовой информацией для решения задач управления большими корпорациями с разнесенными территориально ресурсами. Сюда включается все, что необходимо для получения ресурсов, изготовления продукции, ее транспортировки и расчетов по заказам клиентов.

ERP является улучшенной модификацией MRP-2. Ее цель — интегрировать управление всеми ресурсами предприятия, а не только материальными, как это было в MRP-2.

Еще одной особенностью ERP является, по существу, сохранение подходов к планированию производства, принятых в MRP-2.

В ERP-системах решения о включении изделия в график выпуска продукции может приниматься не только на основе реально имеющегося спроса, но и на основе прогноза спроса и в связи с выполнением больших проектов и программ.

Системы типа ERP дополнены следующими функциональными модулями:

— прогнозирования спроса;

— управления проектами;

— управления затратами;

— управления составом продукции;

— ведения технологической информации;

— модули управления кадрами и финансовой деятельностью предприятия.

Укрупненно структура ERP-системы показана на рис. 2.2.

Ниже поясняются элементы структуры управления ERP, добавленные к системе MRP-2.

**Прогнозирование спроса.** Оценка будущего состояния или пове-

дения внешней среды или элементов производственного процесса. Цель — оценить требуемые параметры в условиях неопределенности. Недостаток информации связан, как правило, с временным фактором. Прогнозирование может носить как самостоятельный характер, так и, предшествуя планированию, представлять собой первый шаг в решении задачи планирования.

**Управление проектами и программами.** В производственных системах, предназначенных для выпуска сложной продукции, собственно производство является одним из этапов полного производственного цикла. Ему предшествуют проектирование, конструкторская и технологическая подготовка, а произведенная продукция подвергается испытаниям и модификации. Для сложной продукции характерны: большая длительность цикла, большое количество предприятий-смежников, сложность внутренних и внешних связей. Отсюда следует необходимость управления проектами и программами в целом и включение соответствующих функций в систему управления.

**Ведение информации о составе продукции.** Обеспечивает информацией требуемого уровня о продукции, изделиях, сборочных единицах, деталях, материалах, а также об оснастке и приспособлениях.

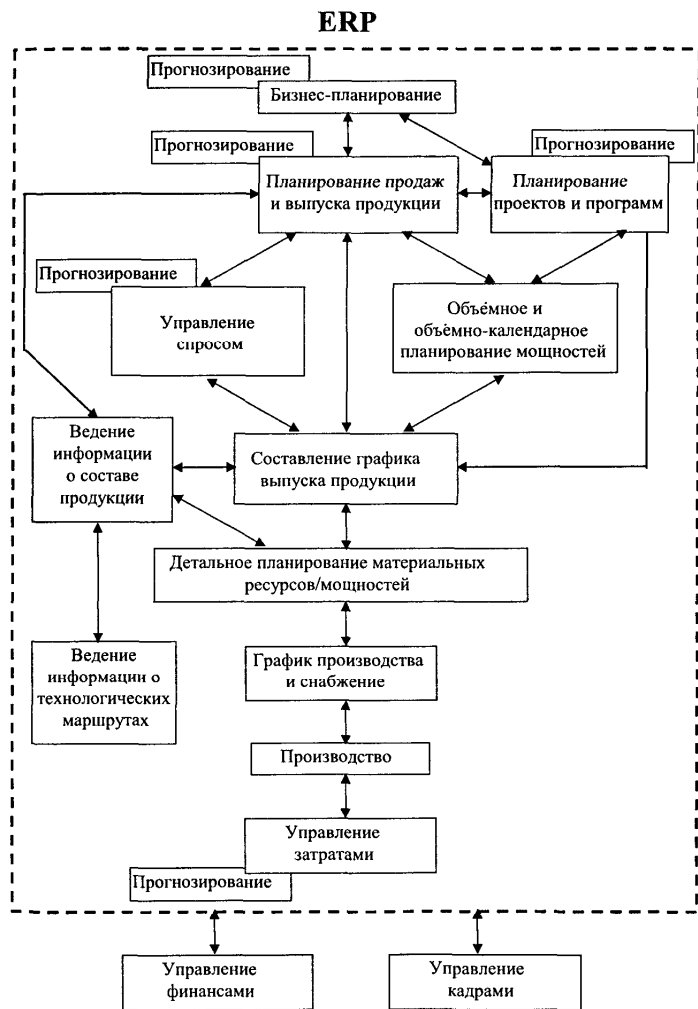


Рис. 2.2. Структура ERP-системы управления

**Ведение информации о технологических маршрутах.** Обеспечивает информацией о последовательности операций, входящих в технологические маршруты, длительности операций и количестве исполнителей или рабочих мест, требуемых для их выполнения.

**Управление затратами.** Обеспечивает связь между управлением производством и управлением финансовой деятельностью с помощью планирования, учета, контроля и регулирования затрат (плановых и фактических). Решается в различных разрезах — по подразделениям, проектам, типам и видам продукции, изделиям и т. п.

**Управление финансами.** Обеспечивает управление финансовой деятельностью. В нее входят четыре основные подсистемы — «Главная бухгалтерская книга», «Расчеты с заказчиками», «Расчеты с поставщиками», «Управление основными средствами».

**Управление кадрами.** Решает задачи управления кадровыми ресурсами предприятия. Задачи, решаемые в подсистеме управления кадрами, связаны с набором, штатным расписанием, переподготовкой, продвижением по службе, оплатой и т. п.

Далее приводится описание тех функциональных компонент ERP, которые обеспечивают управление производственным процессом на предприятии. Главное внимание при этом уделяется методам управления, находящим практическое применение в базовых системах ERP.



### 5.5.3. Пример реализации ERP-системы: АСУ «1С: Предприятие 8.0. Управление производственным предприятием»

#### 5.5.3.1. Общая концепция

Автоматизированная система управления «1С: Предприятие 8.0. Управление производственным предприятием» является комплексным прикладным решением, охватывающим основные контуры управления и учета на производственном предприятии.

Она создает единое информационное пространство для отображения финансово-хозяйственной деятельности предприятия, охватывая основные бизнес-процессы. В то же время четко разграничивается доступ к хранимым сведениям, а также возможности тех или иных действий в зависимости от статуса работников.

В прикладном решении принято следующее соотношение данных различных учетов:

- независимость данных управленческого, бухгалтерского и налогового учета;
- сопоставимость данных управленческого, бухгалтерского и налогового учета;
- совпадение суммовых и количественных оценок активов и обязательств по данным управленческого, бухгалтерского и налогового учета, при отсутствии объективных причин их расхождения.

«1С: Предприятие 8.0. Управление производственным предприятием» может использоваться в ряде подразделений и служб производственных предприятий, включая:

- дирекцию (генеральный директор, финансовый директор, коммерческий директор, директор по производству, главный инженер, директор по кадрам и т.д.);
- производственные цеха;
- склады материалов и готовой продукции;
- отделы главного конструктора, главного технолога, главного механика, сбыта, материально-технического обеспечения (снабжения), маркетинга, планово-экономического, кадров, административно-хозяйственный, капитального строительства;
- бухгалтерию;
- информационно-аналитический отдел;

«1С: Предприятие 8.0. Управление производственным предприятием» предоставляет:

- руководству предприятия и управленцам, отвечающим за раз-

витие предприятия, — широкие возможности анализа, планирования и гибкого управления ресурсами компании для повышения ее конкурентоспособности;

- руководителям подразделений, менеджерам и сотрудникам, непосредственно занимающимся производственной, сбытовой, снабженческой и иной деятельностью по обеспечению процесса производства, — инструменты, позволяющие повысить эффективность ежедневной работы по своим направлениям;

- работникам учетных служб предприятия — средства для автоматизированного ведения учета в полном соответствии с требованиями законодательства и стандартами предприятия.

#### 5.5.3.2. Базовые модули

1) Управление торговлей. Конфигурация позволяет автоматизировать задачи контроля и анализа торговых операций в комплексе со смежными задачами управленческого учета:

- планирование продаж и планирование закупок;
- управление отношениями с клиентами (CRM);
- управление поставками и запасами;
- управление взаиморасчетами с контрагентами;
- бюджетирование.

Конфигурация имеет следующие функциональные возможности:

- построение различных схем формирования цен и скидок;
- формирование отпускных цен с учетом плановой себестоимости продукции и нормы прибыли;
- контроль за соблюдением сотрудниками установленной ценовой политики;
- хранение информации о ценах конкурентов и поставщиков;
- сопоставление отпускных цен предприятия с ценами поставщиков и конкурентов.

2) Управление поставками и запасами. Использование подсистемы управления запасами позволяет эффективно организовать складское хозяйство, повысить производительность труда работников склада, сотрудников снабженческо-сбытовых структур.

Прикладное решение позволяет:

- управлять остатками товарно-материальных ценностей в различных единицах измерения на множестве складов;
- вести раздельный учет собственных товаров, товаров, принятых и переданных на реализацию, возвратной тары;
- учитывать серийные номера, сроки годности и сертификаты;
- контролировать правильность списания серийных номеров и

товаров с определенными сроками годности и сертификатами;

— задавать произвольные характеристики партии (цвет, размер и т.д.) и вести партионный учет в разрезе складов;

— комплектовать и разукрупнять товарно-материальные ценности;

— резервировать товарно-материальные ценности.

3) Управление производством. Производство представляет собой один из наиболее сложных процессов на предприятии. Управление производством тесно связано с управлением закупками, продажами, основными средствами, персоналом, финансами.

Конфигурация «Управление производственным предприятием» позволяет полностью контролировать производственные процессы от момента передачи материалов в производство до выпуска готовой продукции. Оперативно отслеживается выполнение производственной программы, выраженной в планах производства различной детализации — от укрупненных планов до посменных планов производства, а также до отдельных производственных заказов. Предоставляется возможность оперативной коррекции планов по фактическим результатам завершенных периодов, оперативного формирования заявок на покупку и изготовление недостающих материалов и комплектующих изделий.

Конфигурация предоставляет следующие возможности:

— ведение массивов нормативно-справочной информации, необходимых для планирования и учета производства готовой продукции, включая формирование норм расходов сырья и вспомогательных материалов;

— планирование и учет выпуска готовой продукции;

— контроль выполнения производственных заданий;

— обработка производственных заказов;

— учет расхода сырья и материалов, незавершенного производства;

— учет собственного и давальческого сырья, материалов, полуфабрикатов и готовой продукции;

— учет брака;

— учет спецодежды и спецоснастки;

— учет производственных затрат, расчет плановой и фактической себестоимости с использованием методов отражения косвенных затрат;

— анализ выпуска готовой продукции в разрезе различных производственных показателей.

Производственные операции автоматически отражаются в бухгалтерском и налоговом учете.

4) Управление основными средствами. Предоставляются следующие ключевые возможности:

— автоматизация операций по учету оборудования и основных средств;

— учет затрат на выполнение строительных, монтажных и ремонтных работ;

— учет затрат на реконструкцию и модернизацию основных средств;

— формирование отчетности по необходимым разрезам;

— отражение операций с оборудованием и основными средствами в бухгалтерском учете.

5) Управление отношениями с клиентами (CRM). Концепция CRM предполагает регулярный сбор и анализ информации о каждом клиенте, реальном и потенциальном. Конфигурация позволяет делать следующее:

— хранить полную контактную информацию по контрагентам и их сотрудникам, историю взаимодействия с ними;

— регистрировать информацию о поставщиках: условия доставки товаров, надежность, сроки исполнения заказов, номенклатура и цены поставляемых товаров и материалов;

— планировать рабочее время и контролировать рабочие планы работников;

— анализировать незавершенные и планировать предстоящие сделки с покупателями и потенциальными клиентами;

— оперативно контролировать состояние запланированных контактов и сделок;

— проводить интегрированный анализ отношений с клиентами;

— проводить анализ причин срыва выполнения заказов покупателей и объемов закрытых заказов;

— анализировать и оценивать эффективность рекламных и маркетинговых акций.

6) Планирование. Конфигурация предусматривает планирование по следующим направлениям деятельности: продажи, производство, закупки. Планы для отдельных направлений увязываются между собой. Составлять планы удобно в следующей последовательности: в первую очередь составляется план продаж, затем — план производства, в последнюю очередь — план закупок.

На основании планов продаж, производства, закупок составляют-

ся планы для отдельных участков деятельности и отдельных объектов планирования.

7) Бюджетирование. С помощью конфигурации реализуются следующие функции бюджетирования:

— планирование движения средств предприятия на любой период в разрезе временных интервалов, подразделений предприятия, проектов, номенклатуры и т.д.;

— финансовое планирование по нескольким сценариям; формирование текущих бюджетов на основе стратегических бюджетов и с коррекцией по фактическому исполнению бюджета в завершённом периоде;

— мониторинг фактической деятельности предприятия в тех же разрезах, в которых проводилось планирование;

— составление сводной отчетности по результатам мониторинга;

— контроль соответствия заявок на расходование денежных средств рабочему плану на период;

— финансовый анализ;

— анализ доступности денежных средств;

— анализ отклонений плановых и фактических данных.

С механизмами бюджетирования активно взаимодействуют механизмы управления денежными средствами.

8) Управление денежными средствами. В конфигурации формируются денежные документы (платежные поручения, приходные и расходные кассовые ордера и др.), обеспечивается взаимодействие со специализированными банковскими программами типа «Клиент банка», контролируются финансовые потоки, контролируется наличие денежных средств в местах хранения. Предусмотрена возможность денежных расчетов в иностранных валютах.

9) Бухгалтерский учет. Ведется в соответствии с законодательством по всем участкам:

— операции по банку и кассе;

— основные средства и нематериальные активы;

— учет материалов, товаров, продукции;

— учет затрат и расчет себестоимости;

— валютные операции;

— расчеты с организациями, с подотчетными лицами, с персоналом по оплате труда, с бюджетом.

10) Отчетность. Конфигурация обеспечивает построение разнообразных отчетов, предназначенных для анализа всех аспектов деятельности предприятия. Отчеты объединены в комплекты по направлени-

ям деятельности предприятия. Между собой отчеты различаются критериями отбора и принципами отображения информации, степенью детализации. Все отчеты содержат дружественный механизм управления, с помощью которого пользователь может изменять временной период отчета, набор отображаемых показателей, степень детализации, порядок группировки, форму отображения информации и т.д., если его не устраивают настройки по умолчанию.

11) Управление персоналом. Прикладное решение автоматизирует следующие направления деятельности по управлению персоналом:

— планирование потребностей в персонале;

— планирование занятости и графика отпусков работников;

— решение задач обеспечения бизнеса кадрами: подбор, анкетирование и оценка;

— кадровый учет и анализ кадрового состава;

— анализ уровня и причин текучести кадров.

## 5.6. Основы взрывозащиты АСУ

Нередко АСУ, внедряемые на предприятиях химико-технологического комплекса, устанавливаются на участках производства, которые характеризуются повышенной взрывоопасностью вследствие либо постоянного присутствия взрывоопасной среды, либо большой вероятности появления такой среды в случае аварии или нарушения течения технологического процесса. Несоблюдение правил обеспечения взрывобезопасности может привести как многочисленным человеческим жертвам, так и необратимому ущербу для окружающей среды.

Для возникновения опасности взрыва необходимы следующие неблагоприятные условия:

1. Наличие легковоспламеняющихся паров, жидкостей, газов или горючей пыли;
2. Наличие окислителя – воздуха или кислорода;
3. Образование энергии воспламенения – электрической или тепловой.

Для провоцирования взрыва необходимо наличие перечисленных выше компонентов в определенных пропорциях. Так для того, чтобы произошел взрыв, газо-воздушная смесь должна содержать окислитель в определенном диапазоне концентрации. При этом взрывоопасная смесь должна быть в контакте с телом, которое может передать ему достаточную для воспламенения энергию (например, с сильно нагретым проводником или искрящимся контактом).

### 5.6.1. Классификация взрывоопасных зон

Большинство стран Европы, а теперь и страны СНГ, следуют рекомендациям МЭК 79-10, основывающимся на том, что любое место, где существует вероятность наличия взрывоопасной среды, должно быть отнесено к одной из следующих зон:

Зона 0 — зона, в которой взрывоопасная смесь воздуха и газа присутствует постоянно или в течение длительного промежутка времени;

Зона 1 — зона, в которой существует вероятность появления взрывоопасной смеси воздуха и газа при нормальной работе;

Зона 2 — зона, в которой образование взрывоопасной смеси воздуха и газа маловероятно, но если это происходит, то только на короткий промежуток времени.

Любые места, не подпадающие ни под одно из приведенных выше определений, считаются неопасной зоной.

Приведенная выше классификация применима для тех зон, где опасность взрыва возникает вследствие наличия горючих паров, газов или тумана.

Во многих случаях опасность взрыва обусловлена наличием в атмосфере горючей пыли, которая вместе с воздухом образует взрывоопасную пылевоздушную смесь (мукомольный цех, например). Такие зоны классифицируются аналогичным образом:

Зона 20 — области, в которых потенциально взрывоопасная атмосфера, состоящая из пылевоздушных смесей, присутствует постоянно или в течение длительных периодов времени;

Зона 21 — области, в которых существует вероятность присутствия потенциально взрывоопасной атмосферы, состоящей из пылевоздушных смесей, в нормальных условиях эксплуатации, но атмосфера образуется только иногда и только на непродолжительные периоды времени;

Зона 22 — области, в которых при нормальных условиях работы маловероятно присутствие потенциально взрывоопасной атмосферы, образуемой пылевоздушными смесями, а если она образуется, очень редко и только на непродолжительный период времени.

В то же время устройства, применяемые во взрывоопасных зонах, подразделяются на несколько групп/категорий:

#### 1. Группа 1:

- для подземных работ;
- в шахтах и для открытых горных работ;
- для наземной части шахтного оборудования;

#### 2. Группа 2:

- устройства для использования в других областях.

К каждой из этих групп относится оборудование, которое в свою очередь делится по категориям. Категория определяет зону, в которой может использоваться устройство (см. таблицы ниже). Естественно, оборудование должно быть сертифицировано для применения в той или иной зоне.

Группа устройств I (Горнодобывающая промышленность)			
Категория	M1: Очень высокая степень взрывозащиты	M2: Высокая степень взрывозащиты	
Уровень опасности	Взрывоопасная атмосфера присутствует постоянно, в течение длительного времени или образуется часто	Взрывоопасная атмосфера образуется время от времени	Взрывоопасная атмосфера образуется редко и на короткие промежутки времени
Оборудование остается безопасным	При применении 2 защитных мер (двухуровневая защита) при двух неисправностях	Должно быть отключено при образовании взрывоопасной атмосферы	

Группа устройств II (Другие отрасли, в которых могут возникать взрывоопасные атмосферы)						
Категория	1: Очень высокая степень взрывозащиты	2: Высокая степень взрывозащиты	3: Нормальная степень взрывозащиты			
Уровень опасности	Взрывоопасная атмосфера присутствует постоянно, в течение долгого времени или образуется часто	Взрывоопасная атмосфера образуется время от времени	Взрывоопасная атмосфера образуется редко и на короткие промежутки времени			
Оборудование остается безопасным	При применении 2 защитных мер (двухуровневая защита) при двух неисправностях	В случае частых неисправностей в случае одной неисправности	В случае безотказной работы			
Использование	Зона 0	Зона 20	Зона 1	Зона 21	Зона 2	Зона 22
Атмосфера	G (газ)	D (пыль)	G	D	G	D

Табл. 1. Классификация оборудования для взрывоопасных зон.

Такое оборудование требует обязательной сертификации в органах по надзору за промышленной безопасностью, а также периодической поверки.

### 5.6.2. Методы обеспечения взрывозащиты

Все известные и применяемые на практике методы защиты направлены на уменьшение риска взрыва до приемлемого уровня. При этом если система сконструирована правильно, то единичная неисправность в любом ее компоненте не должна приводить к возникновению взрыва.

В общем случае все методы обеспечения взрывозащиты можно условно разделить на четыре основные группы.

**Методы взрывозащиты, направленные на снижение вероятности возникновения электрической искры.**

По данному методу реализуются следующие виды защиты:

1. Взрывозащита вида «е» (повышенная безопасность) предусматривает дополнительные конструктивные меры против возможного превышения допустимой температуры и возникновения дугowych и искровых разрядов, которые при нормальной работе не проявляются;

2. Взрывозащита вида «п» предусматривает дополнительные конструктивные меры против возможности превышения допустимой температуры и возникновения дугowych и искровых разрядов при нормальной и некоторых ненормальных режимах работы;

3. Взрывозащита вида «s» (специальный) может обеспечиваться следующими средствами: заключением электрических цепей в герметичную оболочку со степенью защиты IP67; герметизацией электрооборудования материалом, обладающим изоляционными свойствами (компаундами, герметиками); воздействием на взрывоопасную смесь устройствами и веществами для поглощения или снижения концентрации последних.

**Методы взрывозащиты, направленные на изоляцию электрических цепей от взрывоопасных смесей.**

Метод подразумевает заключение электрических цепей в специальные оболочки, заполненные газообразным, жидкостным или твердым диэлектриком так, чтобы взрывоопасная смесь не находилась в контакте с электрическими цепями.

По данному методу реализуются следующие виды взрывозащиты:

1. Взрывозащита вида «m» — заливка специальным компаундом;

2. Взрывозащита вида «o» — масляное заполнение оболочки;

3. Взрывозащита вида «a» — заполнение оболочки кварцевым песком;

4. Взрывозащита вида «р» — заполнение или продувка оболочки взрывобезопасным газом под избыточным давлением.

### **Методы взрывозащиты, направленные на сдерживание взрыва.**

По данному методу реализована взрывозащита вида «d» (взрывозащитная оболочка).

Данный метод подразумевает, что электрические цепи помещены в специальную прочную оболочку с малым зазором. При этом не исключается контакт электрических цепей с взрывоопасной смесью и возможность ее воспламенения, но при этом гарантируется, что оболочка сдерживает возникшее в результате взрыва избыточное давление, т.е. вспышка не выходит за пределы ограничений взрывонепроницаемой оболочки.

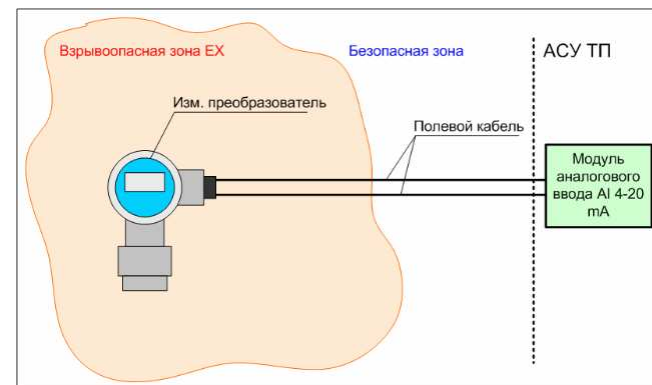
Поскольку раскаленные газы имеют различную проникающую способность, то здесь принимаются во внимание подгруппы газов.

#### **Ограничение мощности искры.**

По данному методу реализована защита вида 'i' (искробезопасная цепь). Данный метод подразумевает, что в случае возникновения искры ее мощности будет недостаточно для воспламенения взрывоопасной смеси. Однако данный метод не исключает контакта взрывоопасной смеси с электрическими цепями.

Благодаря своей универсальности, безопасности и простоте внедрения вид защиты «искробезопасная цепь» (IS, intrinsically safe circuit) наиболее часто применяется при построении АСУ ТП, и поэтому далее речь пойдет в основном о нем.

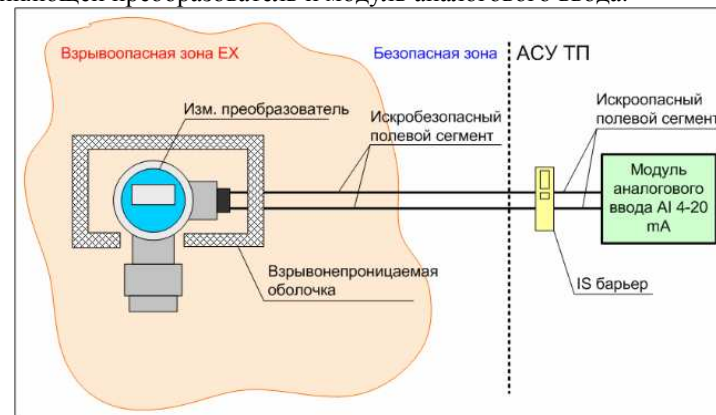
*Пример.* К системе управления технологическим процессом подключен измерительный преобразователь. Этот преобразователь находится во взрывоопасной зоне. Однако инженеры этот факт не учли и спроектировали систему, как если бы она работала в обычных условиях. Возможные последствия такого неправильного технического решения изображены на рис. 1:



**Рис. 1.** Решение, которое не обеспечивает необходимый уровень взрывозащиты.

В первом случае неисправность измерительного преобразователя провоцирует мощный взрыв. Во втором случае происходит искрение полевой кабельной линии, что также приводит к взрыву.

С учетом всех требований по взрывозащите построена система, схематично изображенная на рисунке 2. Поскольку сам измерительный преобразователь находится в опасной зоне, его снабжают взрывонепроницаемой оболочкой (взрывозащита вида «d»). Но как видно из предыдущего примера, этого отнюдь не достаточно. Не менее важно обеспечить искробезопасность электрической (сигнальной) цепи, соединяющей преобразователь и модуль аналогового ввода.



**Рис. 2.** Правильное с точки зрения взрывозащиты решение

Теперь система спроектирована корректно. Неисправность преобразователя не ведет к возникновению взрыва, так как прочная оболочка, в которую помещен полевой преобразователь, сдерживает вспышку и не дает ей распространиться за пределы оболочки. Также теперь учтено, что в результате короткого замыкания, плохого контакта или срабатывания коммутационной части может возникнуть искрение или недопустимый нагрев незащищенного проводника. Об этом заранее позаботились, установив в безопасной зоне специальное электронное устройство, называемое барьером искробезопасности (IS barrier). Из самого названия этого устройства становится ясно, что его главное предназначение – это обеспечение защиты подключенной к нему электрической цепи по методу «искробезопасная цепь».

### 5.6.3. Барьеры искробезопасности

В минимальной конфигурации барьер имеет клеммные колодки, к которым подключаются две электрические цепи. Одна цепь образует так называемый искроопасный (незащищенный) сегмент, другая – искробезопасный (защищенный). К незащищенному сегменту относится электрическая линия, связывающая барьер с соответствующим входом или выходом модуля ввода/вывода. Искробезопасный сегмент проходит непосредственно через взрывоопасную зону и соединяет барьер с полевым устройством. При этом чрезвычайно важно помнить, что, хотя барьер и обеспечивает взрывобезопасность подключенной к нему цепи, сам он не является взрывобезопасным устройством, и его установка в опасной зоне ни при каких условиях недопустима.

Типовая схема подключения барьера изображена на рисунке 3.

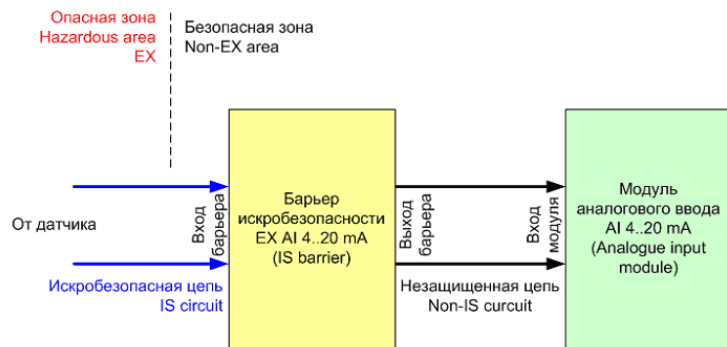


Рис. 3. Схема подключения барьера искробезопасности.

На рисунке изображена схема подключения измерительного преобразователя с токовым выходом к модулю аналогового ввода AI 4-20 через промежуточный барьер. Цепь, соединяющая выход преобразователя и вход барьера, представляет искробезопасный сегмент (часто обозначаемый аббревиатурой Ex от слова Explosive), цепь между выходом барьера и входом модуля аналогового ввода образует незащищенный сегмент.

Какой принцип работы барьера? Экспериментально установлено, что для воспламенения взрывоопасной смеси ей нужно передать определенную энергию  $Q_{пред}$ . Если энергия электрического тока меньше предельно допустимой  $Q_{пред}$ , то гарантируется, что взрыва не произойдет даже при возникновении искры. На этом принципе и построена работа барьера искробезопасности. Естественно, энергию напрямую контролировать сложно, однако можно ограничить мощность электрического тока, протекающего по электрической цепи. Собственно в этом задача барьера и заключается – он осуществляет постоянный контроль и ограничивает мощность электрического тока, протекающего в защищенном сегменте цепи.

Из курса физики известно, что мощность зависит от тока и напряжения и определяется по формуле:

$$P=U*I.$$

Барьер регулирует ток и напряжение таким образом, чтобы мощность  $P$  никогда не превышала определенное предельно допустимое значение  $P_{пред}$ :

$$P < P_{пред}.$$

Так если по каким-либо причинам ток в защищенном сегменте цепи начнет расти, а вместе с ним и мощность, то барьер постарается снизить прикладываемое напряжение, чтобы обеспечить итоговую мощность электрического сигнала меньшую  $P_{пред}$ . На самом деле определенные ограничения распространяются не только на мощность, но и на максимальный ток и напряжение. Строго говоря, барьер следит, чтобы всегда выполнялись сразу три условия:

$$P < P_{пред};$$

$$I < I_{пред};$$

$$U < U_{пред}.$$

Какие бывают барьеры? Барьеры бывают двух типов: пассивные и активные. Пассивные барьеры строятся на основе достаточно простых электронных схем со стабилитронами или диодами. Их отличительной чертой является отсутствие необходимости подводки к ним внешнего питания, однако они требуют очень аккуратного заземления. Пассив-

ные барьеры в основном применяются для подключения активных полевых устройств, требующих отдельное электропитание. Активные барьеры – более функциональные устройства, и с точки зрения схемотехники конструкция у них несколько сложнее. Благодаря наличию в них трансформатора и усилительного каскада, активные барьеры осуществляют гальваническую развязку между подключенными к ним искробезопасными и незащищенными сегментами цепи. Активные барьеры требуют внешнее питание (как правило, от 24 VDC) и служат для подключения пассивных полевых устройств, запитываемых непосредственно по сигнальной цепи.

Барьеры различают по типу подсоединяемого к ним сигнала ввода/вывода. Тут прослеживается полная аналогия с модулями ввода/вывода. В примерах, приведенных выше, мы рассматривали измерительный преобразователь с выходом 4-20 мА; для его подключения к системе управления нам требуется барьер аналогового ввода AI в диапазоне 4-20 мА. Например, если требуется организовать дискретный вывод DO релейного типа, то и соответствующий барьер должен поддерживать дискретный вывод DO релейного типа. В общем смысле различают следующие типы барьеров: DI (дискретный ввод); DO (дискретный вывод); AI (аналоговый ввод) и AO (аналоговый вывод).

Некоторые модели активных барьеров могут также осуществлять преобразование полевого сигнала из одного типа в другой. Например, существуют специальные барьеры для искробезопасного подключения датчиков типа «термосопротивление» (RTD), однако выходной сигнал таких барьеров – это стандартный 4-20 мА. Таким образом, эти барьеры можно подключать к обычным модулям ввода AI 4-20 мА (напомним, что датчики RTD вообще не передают токовый сигнал).

Барьеры также различаются канальностью, т.е. количеством сигнальных цепей, для которых барьер может реализовывать искрозащиту. Наиболее распространены одно- и двухканальные барьеры. Например, к двухканальному барьеру AI2 4-20 мА можно одновременно подключить два датчика с токовым выходом 4-20 мА.

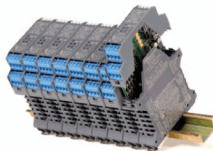


Рис. 4. Барьеры искробезопасности компании GM International.

#### 5.6.4. Системы искробезопасного удаленного ввода/вывода IS Remote IO

Ранее мы рассмотрели построение искробезопасного ввода/вывода с использованием барьеров. Данный подход не всегда себя оправдывает. Ситуацию прояснит следующий показательный пример: допустим, проектируется система управления с тысячей сигналами ввода/вывода (1000 EX IOs), для которых необходимо обеспечить искробезопасность. Какое оборудование для этого потребуется?

Во-первых, нужно организовать саму подсистему ввода/вывода на 1000 каналов. Во-вторых, необходимо обеспечить искробезопасность полевых сигналов путем установки соответствующих барьеров. При средней цене одного барьера в 160 евро (это усредненная цена между барьерами для аналоговых и дискретных сигналов) их суммарная стоимость составит  $160 \text{ евро} \times 1000 = 160\,000 \text{ евро}$ . Причем, эта цена не охватывает дополнительные источники питания, провода, клеммники и сопутствующую монтажную часть. С учетом всего перечисленного стоимость решения по обеспечению искрозащиты может возрасти до 180 000 – 190 000 евро.

Однако есть более элегантное, а главное дешевое, решение. Многие производители АСУ ТП объединили подсистему удаленного ввода/вывода и стандартные барьеры искробезопасности в одном модульном устройстве и дали ему сложное название «узел искробезопасного удаленного ввода/вывода» (Intrinsically Safe Remote IO, или сокращенно IS RIO). Особенностью данного устройства является то, что искрозащита подключенных полевых цепей реализуется в модулях ввода/вывода, а само устройство предназначено для установки непосредственно во взрывоопасных зонах (Ex-зонах).

В качестве примера, на рисунке 1 изображен узел IS RIO серии ET200iSP производства компании Siemens. Узлы ET200iSP допускают установку в Ex-зонах 1, 2 и служат для подключения датчиков и исполнительных устройств, работающих в Ex-зонах 0, 1 и 2.



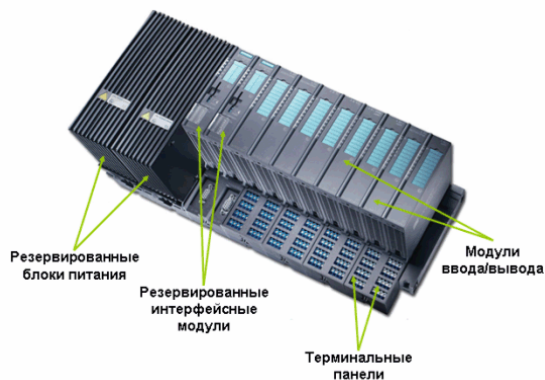


Рис. 1. Узел IS RIO серии ET200iSP компании Siemens.

По конструкции и внешнему виду узел IS RIO не сильно отличается от обычного узла удаленного ввода/вывода. По аналогии можно выделить следующие аппаратные модули:

1. Взрывозащищенный блок питания (или резервированные блоки питания);
2. Искробезопасный интерфейсный модуль (или резервированная пара интерфейсных модулей);
3. Искробезопасные модули ввода/вывода;
4. Терминальные панели.

Каждый модуль ввода/вывода устанавливается на свою терминальную панель, к которой через винтовые клеммы подключаются сигнальные провода полевого ввода/вывода. Для установки интерфейсного модуля используется несколько другая терминальная панель, на которой вместо клемм находится разъем для подключения к цифровой полевой шине. Также существует специальная терминальная панель для установки блока питания. Все терминальные панели монтируются на стандартную профильную шину или DIN-рейку в следующем порядке: первой устанавливается терминальная панель блока питания (или двух резервированных блоков питания), за ним идет терминальная панель интерфейсного модуля (или пары интерфейсных модулей), далее идут терминальные панели модулей ввода/вывода. При состыковке терминальных панелей образуется составная внутренняя шина, проходящая через всю сборку. По этой шине осуществляется информационный обмен между установленными мо-

дулями и подводка к ним электропитания. Модули ввода/вывода по типу аналогичны тем, что используются в обычных системах ввода/вывода: AI, DI, AO и DO. Канальность аналоговых модулей варьируется от 2-х до 8, дискретных – от 8 до 16.

Узлы IS RIO, как правило, поддерживают установку до 8 модулей ввода/вывода. При этом есть жесткие ограничения на суммарно потребляемую мощность. При компоновке узла очень важно следить, чтобы его общее потребление не превышало определенный предел (указанный в прилагаемом руководстве по проектированию), иначе это может привести к чрезмерной нагрузке на источник питания, а недопустимо большие токи снизят уровень взрывозащиты. Во всех системах IS RIO допускается «горячая» замена интерфейсных модулей и модулей ввода/вывода.

Интерфейсный модуль позволяет подключать узел IS RIO к цифровой шине передачи данных, используя стандартный коммуникационный протокол; при этом модуль, как правило, реализует функции ведомого устройства. Наиболее распространены протоколы Profibus, Modbus и ControlNet.

На рисунке 2 представлен узел IS RPI (Intrinsically Safe Remote Process Interface) компании Pepperl Fuchs. Обратите внимание, что в отличие от ET200iSP, данное устройство не резервировано. Также бросается в глаза, что блок питания не устанавливается на терминальную панель в сопряжении с другими модулями узла, а устанавливается отдельно (на рисунке блок питания вообще не изображен).

Модули могут быть использованы для расширенного диапазона рабочих температур от  $-20$  до  $70$  °С, что позволяет устанавливать оборудование IS RPI в шкафах без обогрева в неотапливаемых помещениях и на улице (в условиях средневропейского климата).

Рассмотрим все преимущества и недостатки использования IS RIO на примере. На рис. 3 представлен классический подход организации ввода/вывода. Каждый канал ввода/вывода расключен через IS-барьер.

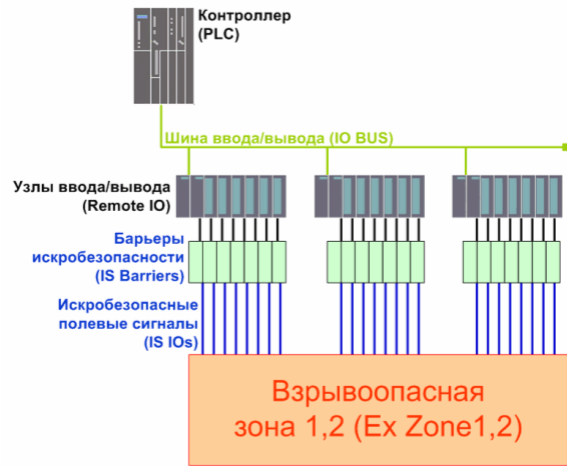


Рис. 3. Схема обеспечения искробезопасности с использованием барьеров

Теперь мы схему слегка оптимизируем и внедрим IS RIO. Результат изображен на рисунке 4. К контроллеру по цифровой шине подключены узлы IS RIO, которые находятся во взрывоопасной зоне 1 недалеко от полевого оборудования. Само же полевое оборудование вообще располагается в зоне 0.

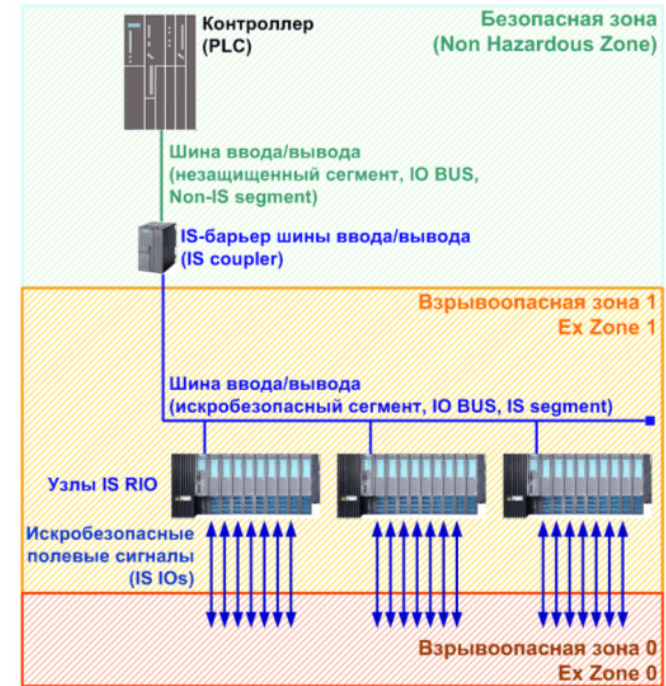


Рис. 4. Схема искробезопасного ввода/вывода на основе IS RIO

Обратите внимание на цифровую шину (IO BUS), соединяющую контроллер и узлы IS RIO. Определенная часть шины проходит во взрывоопасной зоне, поэтому для нее, как и для полевых сигналов, необходимо обеспечить надежную искрозащиту. Это делается с помощью разделительных барьеров для цифровых шин (Bus Couplers), устанавливаемых в безопасной зоне. Некоторые системы IS RIO поддерживают подключение к оптическим цифровым сетям и, естественно, не требуют никаких барьеров шины (оптоволокно в принципе не может быть искробезопасным).

Конечно же, узлы IS RIO не вешаются на стенку в незащищенном виде, а устанавливаются в специальные корпуса (шкафы) для взрывоопасных зон. Корпуса, предназначенные для зоны 1, изготавливаются в соответствии со взрывозащитой типа EEx E (повышенная безопасность) и имеют степень защиты не ниже IP65. Такие корпуса имеют надежные резиновые уплотнения, а кабельные вводы выполнены с

помощью винтовых соединений и надежно герметизированы. Для зоны 2 требования по безопасности несколько демократичнее; хотя и здесь лучше переусердствовать, чем что-то не учесть. На рисунке ниже показан смонтированный шкаф системы IS RIO:



Рис. 5. Пример смонтированного шкафа системы IS RIO

Преимущества применения системы IS RIO очевидны:

1. Сокращение кабельных трасс. В отличие от барьеров, узлы IS RIO могут устанавливаться рядом с датчиками и исполнительными механизмами, а оцифрованные сигналы ввода/вывода передаются на верхний уровень по двухпроводной цифровой шине.

2. Минимизация оборудования. Каждый модуль ввода/вывода системы IS RIO, по сути, выполняет две функции: непосредственный ввод/вывод полевых сигналов и обеспечение искрозащиты подключенных к нему полевых цепей.

Вместе с тем было бы несправедливо не упомянуть один существенный недостаток: требуются достаточно большой объем работ по конфигурированию сетевого интерфейса между контроллерами верхнего уровня и узлами IS RIO, зачастую являющимися по отношению к контроллеру устройствами стороннего производителя. В целом же практика показывает, что применение системы IS RIO оправдано при большой плотности искробезопасных сигналов ввода/вывода, когда их доля составляет не менее 30% от общего числа сигналов; в этом случае стоимость организации уровня ввода/вывода может быть уменьшена на 20-25% по сравнению с решением на основе классических барьеров.

## 6. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

### 6.1. Классификация типовых объектов управления химико-технологического комплекса

Под химико-технологическим процессом (ХТП) понимают определенную последовательность процессов (химических, физико-химических, их сочетаний) целенаправленной переработки исходных сырья и веществ в продукт. Химическое производство представляет собой совокупность процессов и операций, осуществляемых в аппаратах и машинах и предназначенных для целенаправленной переработки исходных веществ и сырья в продукты.

Химико-технологические процессы достаточно сложны и многообразны. Основным критерием, по которому их относят к тому или иному типу, является идентичность этих процессов по физико-химической природе, наличию материальных и энергетических внутренних связей. Их подразделяют на следующие виды:

- процессы переработки различных материалов (сырья) и физико-химические процессы, происходящие в соответствии с законами материального и энергетического баланса. Конечная цель — изготовление полуфабрикатов и готовой продукции;
- транспортные процессы — процессы движения конвейеров, перекладчиков, подъемников, насосов, пневмотранспорта и других технических средств, перемещающих в пространстве сырье, полуфабрикаты и готовую продукцию, а также другие среды. Конечная цель — адресная подача сырья, полуфабрикатов и готовой продукции;
- энергетические процессы — процессы выработки, преобразования и передачи различных видов энергии.

Согласно указанным классификационным признакам, подразделяют следующие типовые технологические процессы:

- механические процессы — перемещение, транспортирование, дозирование, гранулирование, измельчение, смешивание, сортировка, обогащение;
- гидродинамические процессы — перемещение жидкостей, разделение газовых, жидких неоднородных смесей, перемешивание материалов;
- тепло- и массообменные и термодинамические процессы без изменения агрегатного состояния вещества — сжатие, разрежение,

нагрев паром или газом, охлаждение, кондиционирование, вентиляция;

- тепло- и массообменные (диффузионные) процессы, в том числе с изменением агрегатного состояния вещества — разделение газовых смесей, экстрагирование, выпаривание, конденсация, дистилляция, ректификация и сушка;
- химические процессы — окисление, восстановление, нейтрализация, дегидротация, гидролиз, фильтрация и т.д.;
- микробиологические процессы — брожение, стерилизация, приготовление и хранение питательной среды, выпаривание, перегонка, аэрация.

## 6.2. Особенности управления химико-технологическими процессами

Основными особенностями управления ХТП являются:

- 1) сложность и высокая скорость протекания процессов;
- 2) особые свойства перерабатываемых веществ:
  - агрессивность и токсичность;
  - взрыво- и пожароопасность;
  - высокие (или низкие) температуры; высокие (сверхвысокие) давления или глубокий вакуум;

3) высокая чувствительность ряда процессов к нарушениям технологического режима и т. д.

4) не все технологические переменные доступны непосредственному и непрерывному измерению. Такому измерению трудно поддаются показатели состава и качества перерабатываемого сырья и получаемого продукта. Даже в случае прямого и непрерывного измерения, например расходов материальных потоков, как следует из сведения материальных балансов, на крупных химических предприятиях потери исходного сырья и веществ, конечных продуктов достигают 2,0...2,5 %.

5) для ХТП процессов, осуществляемых в крупнотоннажных производствах, характерно запаздывание, поэтому переменные, выбранные для управления, при изменении условий проведения процесса не могут изменяться мгновенно.

б) невозможность прямых и непрерывных измерений переменных процесса, отсутствие мгновенной реакции переменных процесса на возмущающие воздействия усложняют систему управления ХТП.

Необходимо также помнить, что управление будет более эффективным, если выбранная управляемая переменная чувствительна к условиям проведения ХТП. Тогда даже небольшие отклонения текущих значений управляемой переменной от заданного вызовут к действию систему управления.

Кроме того, все время необходимо учитывать степень воздействия химических производств на окружающую среду, поэтому системы управления должны обеспечить безопасность химических производств.

Исходя из изложенных особенностей ХТП, основными функциями, выполняемыми устройствами автоматического управления в химической технологии являются:

1. Диагностика оборудования, измерение и контроль технологи-

ческих параметров и определение причин возникновения аварийных ситуаций.

2. Сигнализация (световая и звуковая) при отклонении технологических параметров от заданных режимов и аварийном состоянии оборудования.

3. Логическое управление блокировками и защитой; аварийное отключение (переключение) технологического оборудования.

4. Управление (регулирование) технологическими переменными.

Сущность разработки АСУ заключается в том, чтобы, располагая сведениями о свойствах объекта управления (статических и динамических), а также заданными требованиями к системе управления в целом (запасу устойчивости, надежности, усилению по мощности, качеству и т. д.), подобрать соответствующие технические средства и составить схему управления, способную действовать в реальных условиях производства в соответствии с поставленными требованиями. Этот подход предполагает наличие сведений об элементах, устройствах, входящих в состав АСУ, а также то, что они должны рассматриваться во взаимодействии друг с другом, и при этом вся система управления в целом должна быть работоспособна и обладать требуемыми свойствами.

## СОКРАЩЕНИЯ

АСУП – автоматизированная система управления предприятием  
АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами

ВП – вторичный прибор

ИМ – исполнительный механизм

ИП – измерительный преобразователь

ЛВС – локальная вычислительная сеть

ЛПС – локальная промышленная сеть

ОС – обратная связь

ОУ – объект управления

ПЛК – программируемый логический контроллер

РО – регулирующий орган

PCY – распределенная система управления

САК – система автоматического контроля

САУ – система автоматического управления

СУ – система управления

AI (Analogue Input) – ввод аналоговых полевых сигналов.

alarm – аварийная сигнализация, оповещение о наступлении или угрозе наступления аварийной ситуации.

alarm journal – журнал аварийных сигнализаций. Список аварийных сигнализаций, отсортированный в хронологическом порядке.

AO (Analogue Output). Вывод аналоговых полевых сигналов.

APS (Advanced Planning and Scheduling System — APS) – продвинутая система управления

archive – архив (история) значений технологических переменных за прошедший период времени. Часто еще называется HISTORICAL ARCHIVE.

baseplate – базовая панель. Служит для установки электронных модулей в специальные слоты. Неотъемлемая часть модульной системы.

CFC (Continuous Flow Chart). Непрерывная функциональная диаграмма. Язык программирования ПЛК.

DCS (Distributed Control System). Распределенная система управления (PCY).

DI (Discrete Input). Ввод дискретных полевых сигналов.

DISTRIBUTED IO, REMOTE IO. Распределенный (удаленный) ввод/вывод. Полевой ввод/вывод, расположенный на значительном

удалении от центрального устройства управления.

ERP (Enterprise Resource Planning) – планирование ресурсов предприятия. Комплексное решение для управления производством на уровне предприятия.

DO (Discrete Output). Вывод дискретных полевых сигналов.

ES (Engineering Station). Инженерная станция. Станция инженерного обслуживания АСУ ТП.

EX (сокр. от слова Explosive). обозначение взрывоопасных зон и участков производства. Такую маркировку имеет оборудование, предназначенное для эксплуатации во взрывоопасных зонах.

FBD (Functional Block Diagram). Диаграмма функциональных блоков. Один из пяти стандартизированных языков программирования ПЛК.

feedback – обратная связь. Информационная связь в контуре регулирования между датчиком, измеряющим значение регулируемой величины, и входом регулятора.

FO (Fiber Optic). Оптоволокно. Физическая среда передачи данных.

history (история) – на техническом жаргоне архив значений технологических переменных.

HISTORIAN. Во многих АСУ ТП так называется специальное ПО и/или «железо» для долгосрочного архивирования значений технологических переменных.

HMI (Human Machine Interface). Человеко-машинный интерфейс. Интерфейс взаимодействия человека-оператора с АСУ ТП.

IL (Instruction List). Список инструкций. Один из пяти стандартизированных языков программирования ПЛК.

INDUSTRIAL ETHERNET. Семейство протоколов промышленных сетей на базе Ethernet (IEEE 802.3). К Industrial Ethernet обычно относят Profinet, EtherCAT, Ether/IP и некоторые другие.

INTERFACE MODULE. Интерфейсный модуль. Электронный модуль для подключения устройства к сети.

IO (Input Output). Подсистема ввода/вывода полевых сигналов. Неотъемлемая часть любой АСУ ТП.

IO BUS. Цифровая шина полевого ввода/вывода. Как правило, связывает контроллер и удаленные устройства ввода/вывода.

IO MODULE. Электронный модуль для подключения полевых приборов: датчиков и исполнительных механизмов. Часть подсистемы ввода/вывода.

IS (Intrinsically Safe). Так обозначаются электрооборудование и

электрические цепи, в которых реализована взрывозащита вида «искробезопасная электрическая цепь» (искрозащита).

IS-Barrier (Intrinsically Safe Barrier). Барьер искробезопасности.

IS RIO (Intrinsically Safe Remote Input/Output). Система искробезопасного удаленного ввода/вывода.

LAN (Local Area Network, ЛВС). Локальная вычислительная сеть.

LD (LAD, LADDER). Лестничная диаграмма. Один из пяти стандартизированных языков программирования ПЛК.

LOCAL IO (Input Output). Локальный ввод/вывод. Ввод/вывод, встроенный непосредственно в устройство управления, либо установленный на той же базовой панели виде модульной системы.

MES (Manufacturing Execution System) – производственная исполнительная система. Комплексное решение для управления производством на уровне цеха.

MODBUS, PROFIBUS, DEVICENET, CAN, FOUNDATION FIELDBUS (FF). Промышленные стандарты передачи данных по цифровым шинам. Существуют разновидности каждого из этих стандартов.

MRP (Manufacturing Resource Planning) – комплексное решение для управления производством на уровне предприятия (экономические аспекты).

MTU (Master Terminal Unit). Главный терминал. Компонент SCADA-систем.

OPC (OLE for Process Control). Клиент-серверный протокол обмена данными между распределенными приложениями. Применяется в промышленных системах.

OPERATOR ACTIONS JOURNAL. Журнал действий оператора.

OPERATOR PANEL (Операторская Панель). Компактная вычислительная машина со встроенным жидкокристаллическим дисплеем, предназначенная для визуализации и операторского управления технологическим процессом.

OS (Operator Station). Операторская рабочая станция для управления технологическим процессом.

PID (ПИД, пропорционально-интегро-дифференциальный). Разновидность непрерывного регулятора, применяемого для поддержания заданного значения регулируемой величины.

PLC (Programmable Logic Controller) – программируемый логический контроллер (промышленный контроллер). В узком смысле — аппаратное средство, реализующее автоматизированное управление технологическим процессом. В широком понимании – класс АСУ ТП.

PV (Process Value). Текущее значение регулируемой величины, подаваемое на вход регулятора. Таким образом реализуется обратная связь.

RTU (Remote Terminal Unit). Удаленный терминал. Компонент SCADA-систем.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – сбор данных и диспетчерское управление. Комплексное решение для управления производством на уровне участка цеха. В узком смысле – пакет визуализации процесса. В широком понимании – класс АСУ ТП.

server. (сервер) компьютер для обслуживания множества операторских станций и других компьютеров.

setpoint. Уставка, заданное значение регулируемой величины, подаваемое на вход регулятора.

SFC (Sequential Function Chart). Язык последовательных функциональных схем. Один из пяти стандартизированных языков программирования ПЛК.

SQL-сервер. система управления реляционными базами данных (СУБД). Основной используемый язык — структурированный язык запросов (SQL).

ST (Structured Text). Структурированный текст. Один из пяти стандартизированных языков программирования ПЛК.

TERMINAL BUS. Шина передачи данных между операторскими станциями, контроллерами и серверами. Сеть верхнего уровня АСУ.

VISUAL SUPERVISOR (Графический Супервизор). Промышленный контроллер со встроенным человеко-машинным интерфейсом.

## СЛОВАРЬ

Выделенные *курсивом* слова имеют собственную словарную статью. В скобках цифры указаны соответствующие разделы

**Возмущения** – нежелательные, трудно контролируемые отклонения характеристик производственного процесса (*объекта управления*) от заданного (нормального) режима, вызванные различными причинами: разнородное качество сырья; изменение эксплуатационных характеристик оборудования (например, вследствие старения, износа, коррозии, скрытых поломок и т. п.); внешними факторами (климатические – температура, влажность).

**Датчик** – специальное техническое средство *системы автоматического управления*, предназначенное для преобразования физической величины (например, температуры  $T$ , давления  $P$ , расхода  $F$ , концентрации  $Q$ , массы  $W$ , скорости  $S$  и т. д.) в сигнал, удобный для передачи (электрический, гидравлический, пневматический, механический) (см. 2.2).

**Измерительный преобразователь** – (см. Датчик)

**Исполнительный механизм** – специальное техническое средство *системы автоматического управления*, предназначенное для отработки управляющего воздействия. Обычно это силовое устройство с достаточно большой мощностью (двигатели электрические, гидравлические, пневматические, электромагнитные, поршневые устройства, муфты) (см. 2.4.1)

**Квитирование** – подтверждение оператором SCADA-системы получения информации об аварийном сигнале (см. 5.3.2.3).

**Локальная промышленная сеть** – специальное техническое средство *системы автоматического управления*, предназначенное для связи и передачи информации между компонентами АСУ (см. 2.1).

**Мнемосхема** (экранная форма) – наглядное графическое изображение технологической части интегрированное со средствами контроля и управления. Она является важнейшим источником информации о характере и структуре связей, текущем состоянии переменных (в том числе связанных с нарушением технологических режимов, авариями и т. п.) и позволяет оператору-технологу:

- облегчить запоминание хода технологического процесса и назначения устройств и органов управления;
- определить способы действия при различных режимах работы

объекта;

- способствовать упрощению поиска и опознания нужной информации для оперативного принятия правильных решений. (см. 5.3.5.1)

**Обратная связь (ОС)** – связь между *объектом управления* и *системой управления* позволяющая осуществить выбор управляющего воздействия в зависимости от состояния системы (рис. 1).

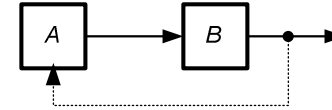


Рис. 1. Схема обратной связи

Элемент  $A$  связан каналами прямой и обратной связи (точечная линия) с элементом  $B$ . По каналу обратной связи элемент  $A$  получает информацию об изменениях, происходящих в элементе  $B$  в результате влияния полученной от  $A$  информации. Таким образом, с помощью обратной связи получают сведения о результатах управляющих и внешних возмущениях на объект, при этом обеспечиваются необходимые воздействия входных и выходных сигналов.

Суть обратной связи состоит в том, чтобы использовать сами отклонения системы (объекта) от определенного (заданного) состояния для формирования управляющего воздействия. Сигналы, поступающие по каналам обратной связи, обеспечивают регулирование состояния (деятельности) объекта (см. 1.1.1.3.).

**Объект управления (ОУ)** – производственные процессы, входящие в производственные системы (см. 1.1.1.2.).

**Переменная** – технологическая величина, характеризующая или влияющая на ход протекания производственного процесса (например, температура, давление, расход, концентрация и т. д.).

**Промышленный контроллер** – специальное техническое средство *системы автоматического управления*, предназначенное для формирования управляющего воздействия: для непрерывных систем обычно, П-, ПИ- и ПИД закон регулирования, для дискретных – по заданному закону - программе последовательности действий (см. 2.3).

**Регулирующий орган** – специальное техническое средство *системы автоматического управления*, предназначенное для непосредственного воздействия на объект управления путём изменения количественных и качественных характеристик материальных и энергетических



ческих потоков (вентили, клапаны, дозаторы, насосы, компрессоры, транспортеры, шнеки, вентиляторы, заслонки, шиберы, прижимные вальцы, каландры, ТЭНы, режущий инструмент и т. п.) (см. 2.4.2.).

**Система автоматического управления (САУ)** – реализует посредством специальных технических средств (*датчики, локальные промышленные сети, промышленные контроллеры, компьютеры исполнительные механизмы, регулирующие органы* и т. п.) совокупность целенаправленных воздействий, призванных обеспечить нормальный ход протекания производственного процесса, его эффективное (с точки зрения заданных *критериев*) функционирование (см. 1.1.2 – 1.1.4.).

**Тренд** – график изменения переменной (переменных) технологического процесса во времени. Составная часть визуализации мнемосхем SCADA-систем. Различают тренд реального времени и исторический тренд.

**Тэг** – переменная технологического процесса в SCADA-системе.

**Чувствительность измерительного прибора** – отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой (входной) величины. (см. 1.1.2).

## ЛИТЕРАТУРА

### *Лекции*

*Беспалов А.В., Харитонов Н.И.* Системы управления химико-технологическими процессами. — М.: Академкнига, 2007. — 690 с.

Книга скорее для бакалавров и магистров, достаточно много отпугивающей математики, но есть и много полезных практических примеров.

*Денисенко В.В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. — М.: Горячая линия-Телеком, 2009. — 608 с.

Практическая книга, но все-таки больше подходит для профессиональных автоматчиков, а не технологов.

*Кузьміцкі І.Ф., Кобрынец В.П., Лебедзеў В.Д.* Аўтаматыка, аўтаматызацыя і аўтаматызаваныя сістэмы кіравання хімічна-тэхналагічнымі працэсамі. — Мн.: БДТУ, 2005. — 318 с.

В учебнике приведено много функциональных схем автоматизации конкретных технологических процессов. В приложении даны сведения о современных технических средствах автоматизации, т.е. приборах и средствах автоматизации.

*Федоров Ю.Н.* Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Учебно-практическое пособие. — М.: Инфра-Инженерия, 2008. — 928 с.

Несмотря на внушительный объем, очень специфическое и во многом полемическое издание, что не очень подходит под определение справочника. Особо интересен раздел, посвященный идентификации переменных АСУ.

*Харазов В.Г.* Интегрированные системы управления технологическими процессами. — СПб.: Профессия, 2009. — 592 с.

По сути это справочник. Приведено огромное количество современных технических средств автоматизации: датчики, контроллеры, исполнительных механизмов и регулирующих органов), а также неплохой обзор SCADA-систем.

### *Практические занятия*

Барашко О.Г. Электронная версия 1.3.

### *Лабораторные работы*

Электронная версия 1.5.2.

<b>ПАНОРАМА КУРСА</b>	<b>3</b>
<b>1. КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (САУ)</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Системы управления: ключевые понятия и определения</b>	<b>7</b>
1.1.1. Базовые компоненты	7
1.1.1.1. Общая структура	7
1.1.1.2. Объект управления (иерархичность, переменные)	9
1.1.1.3. Обратная связь	15
1.1.2. Локальная САУ (структура, базовые элементы, критерии управления)	17
1.1.3. Функции локальных САУ	21
1.1.4. Локальные САУ: классификация	23
1.1.5. Автоматизированная система управления (уровни управления)	29
<b>1.2. Способы описания САУ</b>	<b>33</b>
1.2.1. Математическое описание САУ	33
1.2.1.1. Математическое описание САУ с помощью дифференциальных уравнений	33
1.2.1.2. Математическое описание САУ с помощью передаточных функций	35
1.2.1.3. Математическое описание САУ с помощью временных характеристик	37
1.2.1.4. Математическое описание САУ с помощью частотных характеристик	38
1.2.2. Типовые динамические звенья САУ	41
1.2.3. Структурные схемы САУ и их преобразования /соединения/	45
1.2.4. Динамические свойства непрерывных объектов управления	49
1.2.5. Статические и динамические характеристики САУ	53
<b>1.3. Измерения и методы измерений</b>	<b>55</b>
1.3.1. Классификация измерений и погрешности измерений	55
1.3.2. Классификация измерительных приборов	59
1.3.3. Метрологические характеристики измерительных приборов и устройств	63
1.3.4. Измерительные схемы САК	67
1.3.4.1. Мостовая измерительная схема	67
1.3.4.2. Компенсационная измерительная схема	68
1.3.5. Структура и классификация систем автоматического контроля	69
<b>1.4. Схемы автоматизации</b>	<b>71</b>
1.4.1. Функциональные схемы автоматизации	71
1.4.1.1. Назначение	71
1.4.1.2. Обозначение объектов управления	72
1.4.1.3. Обозначение коммуникационных (материальных) потоков и их регулирующих устройств	73
1.4.1.4. Обозначение средств автоматизации: общие положения	74
1.4.1.4. Обозначение линий связи	78
1.4.1.5. Обозначение средств автоматизации: варианты применения	79
1.4.1.6. Обозначение промышленных контроллеров и рабочих станций SCADA-систем	84
1.4.2. Принципиальные электрические схемы автоматизации	87
1.4.2.1. Назначение и общие принципы построения	87
1.4.2.2. Основные требования к содержанию и оформлению схем	90

<b>2. СРЕДСТВА И УСТРОЙСТВА ОБМЕНА, ВВОДА, ОБРАБОТКИ И ВЫВОДА ИНФОРМАЦИИ В САУ</b>	<b>95</b>
<b>2.1. Средства и устройства обмена</b>	<b>95</b>
2.1.1. Локальные промышленные сети (ЛПС)	95
2.1.2. Эталонная модель взаимодействия открытых систем (OSI-модель)	97
2.1.3. Топология (архитектура) ЛПС	99
2.1.4. Аппаратные компоненты ЛПС	101
2.1.4.1. Канал передачи данных	101
2.1.4.2. Сетевые устройства ЛПС	103
2.1.5. Промышленные сети нижнего уровня (полевые шины)	105
2.1.6. Промышленные сети верхнего уровня	111
<b>2.2. Средства и устройства ввода</b>	<b>117</b>
2.2.1. Первичные преобразователи (датчики) перемещений	117
Дискретные контактные датчики перемещений	118
Непрерывные датчики перемещений	119
а) Потенциометрические датчики (реостатные)	119
б) Индуктивные датчики (электромагнитные)	120
в) Емкостные датчики	122
г) Фотоэлектрические датчики (бесконтактные)	122
2.2.2. Первичные преобразователи (датчики) уровня	125
1. Механические	125
2. Электрические датчики	127
3. Радиационные датчики	130
4. Ультразвуковые датчики	131
Типовые функциональные схемы систем автоматического контроля уровня	132
2.2.3. Первичные преобразователи (датчики) давления	133
1. Жидкостные приборы	134
2. Деформационные приборы (манометры)	135
3. Грузопоршневые приборы	137
4. Электрические приборы	137
Измерение перепада давлений	138
Типовые функциональные схемы систем автоматического контроля давления	140
2.2.4. Первичные преобразователи (датчики) температуры	141
2.2.5. Первичные преобразователи (датчики) расхода	147
Расходомеры переменного перепада давления	147
Расходомеры постоянного перепада давления (жидкость, газ) – или расходомеры обтекания.	149
Тахометрические расходомеры	149
Индукционные расходомеры	151
Ультразвуковые расходомеры.	152
Типовые функциональные схемы систем автоматического контроля расхода	153
<b>2.3. Средства и устройства обработки</b>	<b>155</b>
2.3.1. Назначение, основные свойства и условия эксплуатации промышленных контроллеров	155
2.3.2. Аппаратная структура контроллера	158
2.3.3. Программное обеспечение PLC	165
2.3.3.1. Основные требования и компоненты	165

2.3.3.2. Языки программирования	167
<b>2.4. Средства и устройства вывода</b>	<b>175</b>
2.4.1. Исполнительные механизмы	175
2.4.2. Регулирующие органы	181
<b>3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ</b>	<b>185</b>
<b>3.1. Классификация автоматических регуляторов</b>	<b>185</b>
<b>3.2. Законы регулирования</b>	<b>186</b>
<b>3.3. Временная характеристика регуляторов непрерывного типа</b>	<b>191</b>
<b>3.4. Сравнительная характеристика типов регуляторов и области их применения</b>	<b>195</b>
<b>3.5. Качество процесса управления</b>	<b>197</b>
3.5.1. Устойчивость САУ и критерии устойчивости	197
3.5.1.1. Устойчивость САУ	197
3.5.1.2. Алгебраический критерий Рауса-Гурвица	198
3.5.1.3. Графоаналитический критерий Михайлова	199
3.5.2. Показатели качества САУ	201
<b>3.6. Методы выбора и расчета регуляторов</b>	<b>205</b>
3.6.1. Выбор регулятора	205
3.6.2. Расчет параметров настройки регулятора	207
<b>4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ</b>	<b>209</b>
<b>4.1. Основные определение и классификация</b>	<b>209</b>
<b>4.2. Математическое описание работы дискретных СЛУ (уравнения алгебры логики и таблицы состояния)</b>	<b>209</b>
<b>4.3. Основные преобразования алгебры логики</b>	<b>211</b>
<b>4.4. Синтез одноконтурных СЛУ</b>	<b>213</b>
<b>4.5. Построение СЛУ на основе циклограмм</b>	<b>215</b>
<b>4.6. Типовые схемы блокировок, применяемые в СЛУ</b>	<b>217</b>
<b>4.7. Типовые схемы сигнализации</b>	<b>221</b>
<b>5. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ</b>	<b>223</b>
<b>5.1. Автоматизированные системы управления (АСУ)</b>	<b>223</b>
<b>5.2. Локальные САУ</b>	<b>225</b>

5.2.1. PLC-системы	225
5.2.2. DCS-системы	227
<b>5.3. SCADA-системы</b>	<b>231</b>
5.3.1. Решаемые задачи и общая структура	231
5.3.2. Критерии выбора SCADA-системы	233
5.3.2.1. Общие подходы	233
5.3.2.2. Эксплуатационные показатели	234
5.3.2.3. Экономические показатели	234
5.3.2.4. Технические показатели	235
5.3.3. HMI на базе операторских станций	239
5.3.4. HMI на базе операторских панелей	245
5.3.5. Основные механизмы обработки информации в SCADA-системах	249
5.3.5.1. Визуализация функционирования ОУ на основе мнемосхем	249
5.3.5.2. Протоколирование (архивирование) и обработка процессных переменных	255
5.3.5.3. Протоколирование и обработка особых состояний (тревоги и события), аварийные сигнализации	259
5.3.5.4. Действия операторов-технологов	264
5.3.6. Архитектура системы архивирования	265
<b>5.4. MES-системы</b>	<b>269</b>
5.4.1. Назначение и типовые функции	269
5.4.2. Оперативно-календарное (детальное) планирование	273
5.4.3. Диспетчеризация производственных процессов в цеху	277
<b>5.5. ERP-системы</b>	<b>281</b>
5.5.1. Концепции MRP, MRP-2	281
5.5.2. Концепция ERP	285
5.5.3. Пример реализации ERP-системы: АСУ «1С: Предприятие 8.0. Управление производственным предприятием»	289
5.5.3.1. Общая концепция	289
5.5.3.2. Базовые модули	290
<b>5.6. Основы взрывозащиты АСУ</b>	<b>295</b>
5.6.1. Классификация взрывоопасных зон	295
5.6.2. Методы обеспечения взрывозащиты	298
5.6.3. Барьеры искробезопасности	301
5.6.4. Системы искробезопасного удаленного ввода/вывода IS Remote IO	304
<b>6. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ</b>	<b>311</b>
<b>6.1. Классификация типовых объектов управления химико-технологического комплекса</b>	<b>311</b>
<b>6.2. Особенности управления химико-технологическими процессами</b>	<b>313</b>

<b>СОКРАЩЕНИЯ</b>	<b>315</b>
<b>СЛОВАРЬ</b>	<b>319</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	<b>322</b>