

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Ивановский государственный химико-технологический университет

А.П.Самарский

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

Электронные системы

Учебное пособие

Иваново 2016

УДК 681.58

Самарский А.П. Технические средства автоматизации. Электронные системы: учеб. пособие / А.П.Самарский; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.-Иваново, 2016. – 76 с.

В учебном пособии рассмотрены принципы построения и функционирования электронных технических средств локальных систем автоматизации и комплексов технических средств АСУТП. Дано описание устройства и принципа действия, проанализированы статика и динамика типовых элементов, узлов, регуляторов и функциональных блоков электронных систем автоматического регулирования. Рассмотрены принципы построения и функционирования подсистем ввода/вывода микропроцессорных контроллеров, используемых в системах управления технологическими процессами. Даны характеристики стандартных интерфейсов, используемых для обмена данными в АСУТП.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Управление в технических системах» и «Автоматизация технологических процессов и производств».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета

Рецензенты:

Научно-производственное предприятие ООО «Стандартпласт», г. Иваново;  
кандидат технических наук П.В. Гриневич (ПО ООО «Индасофт»).

© Самарский А.П., 2016

© ФГБОУ ВО «Ивановский государственный  
Химико-технологический университет,  
2016

## Введение

Как показывает опыт автоматизации интенсивных и сложных технологических процессов в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности, разработка и эксплуатация автоматизированных производств требует системного подхода, который можно сформулировать в виде ряда принципов.

1. Современное производство должно создаваться как единый автоматизированный технологический комплекс (АТК), состоящий из технологического объекта управления (ТОУ) и системы управления (СУ). В создании АТК должны принимать участие специалисты по технологии, системам управления, техническому и программному обеспечению.

2. Функциональная, техническая и организационная структура СУ определяется целями автоматизации и особенностями ТОУ.

3. Одновременно с задачами автоматизации ТОУ должны быть решены задачи полной механизации всех стадий технологического процесса, а также задачи автоматизации транспортно-складского хозяйства, оперативно-диспетчерского управления и др.

4. Инженерно-технический состав предприятия должен быть профессионально подготовлен и заинтересован в скорейшем внедрении АТК.

5. АТК должен иметь резервы для дальнейшего развития.

6. Разрабатываемая СУ должна быть надежна, доступна в освоении и удобна в эксплуатации.

Каждый из перечисленных системных принципов требует соответствующего технического обеспечения, функциональность и характеристики которого определяются в соответствии с местом, занимаемым определенным классом технических средств в системе управления предприятием.

В мировой практике специалисты по комплексной автоматизации производства выделяют пять уровней управления современным предприятием (рис. В1).

На уровне ERP – Enterprise Resource Planning (планирования ресурсов предприятия) осуществляется расчет и анализ финансово-экономических показателей, решаются стратегические административные и логистические задачи.

На уровне MES – Manufacturing Execution Systems (исполнительной системы производства) решаются задачи управления качеством продукции, планирования и контроля последовательности операций технологического процесса, управления производственными и людскими ресурсами в рамках технологического процесса, технического обслуживания производственного оборудования.

Эти два уровня относятся к задачам АСУП (автоматизированным системам управления предприятием и производством) и технические средства, с помощью которых эти задачи решаются, – это офисные персональные компьютеры (ПК) и рабочие станции на их основе в службах главных специалистов предприятия.

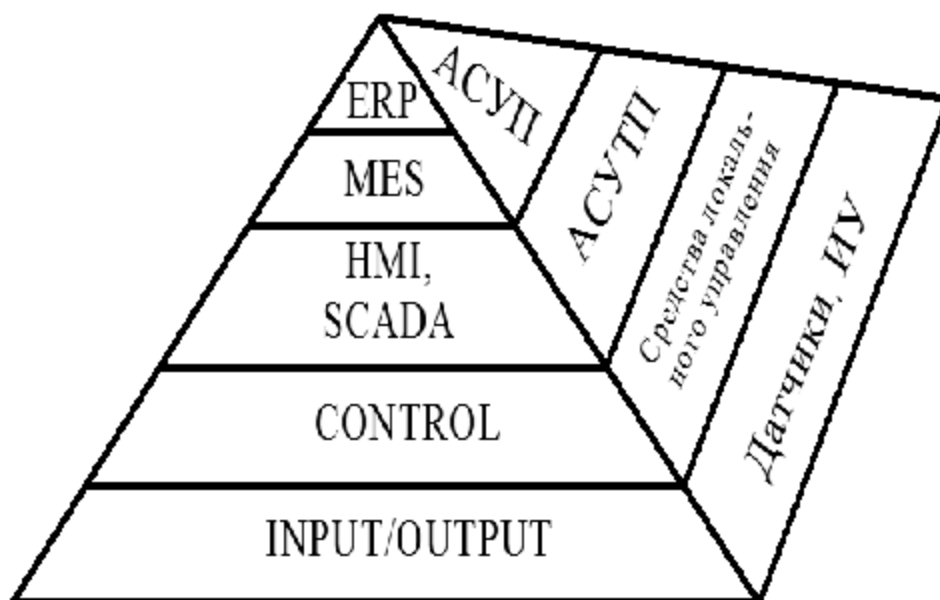


Рис. В1. Пирамида управления современным предприятием

На следующих трех уровнях решаются задачи, которые относятся к классу АСУ ТП (автоматизированных систем управления технологическими процессами).

Уровень SCADA–Supervisory Control and Data Acquisition (сбор данных и супервизорное управление) – это уровень тактического оперативного управления, на котором решаются задачи оптимизации, диагностики, адаптации и т.п. Значимая роль на этом уровне отводится оперативному персоналу, который взаимодействует с системой управления с использованием средств HMI–Human-Machine Interface (человеко-машинного интерфейса).

Уровень Control – уровень непосредственного (локального) управления. На этом уровне решаются задачи автоматического регулирования и логического управления технологическим процессом, а также задачи технологической и аварийной сигнализации и противоаварийной защиты. Техническим обеспечением данного уровня служат средства локальных систем регулирования и управления, а также средства нижнего уровня АСУТП – микропроцессорные программируемые контроллеры в соответствующей комплектации.

Уровень Input/Output (Входы/Выходы) представлен техническими средствами получения информации о состоянии ТОО (датчиками) и средствами использования информации в целях управления (исполнительными устройствами).

Настоящее учебное пособие посвящено рассмотрению принципов построения и функционирования технических средств уровней SCADA и Control как важнейших уровней систем автоматизации технологического процесса. Рассматриваемые технические средства относятся к электрической ветви Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации и используют для обмена информацией унифицированные электрические сигналы.




## 1. Унифицированные электрические сигналы

Все виды информации в электронных системах контроля и управления передаются посредством унифицированных электрических сигналов.

Под унифицированным сигналом понимают изменяющуюся в нормированных пределах несущую величину (физическую величину, используемую для передачи информации), параметры которой определяются содержанием передаваемой информации. В электронных системах контроля и управления в качестве несущей величины обычно используют ток или напряжение. Классификация унифицированных электрических сигналов приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Классификация унифицированных электрических сигналов

Характеристики	Виды сигналов							
	Аналоговые				Дискретные			
	Непрерывные			Импульсные			Двоичные	Цифровые
Несущая величина	Постоянный ток	Постоянное напряжение	Переменное напряжение	Ток, напряжение			Ток, напряжение	Ток, напряжение
Способ модуляции	По амплитуде		По частоте	Амплитудно-импульсная	Широтно-импульсная	Фазоимпульсная	Дискретный сигнал с двумя логическими уровнями	Кодовая
Количественные характеристики, форма сигнала	0÷5 0÷20 4÷20 мА	0÷1 0÷10 0÷100 мВ 0÷1 0÷10 В	0÷100 0÷200 1000÷ 2500 Гц				0;5 0;10 0;20 мА 0;5 0;10 0;24 В	В соответствии с типом используемого интерфейса

Аналоговые сигналы характеризуются непрерывной зависимостью параметров модулированной несущей величины от содержания передаваемой информации. Аналоговые непрерывные сигналы традиционно используются для передачи информации от аналоговых датчиков к преобразователям, показывающим и регистрирующим устройствам системы управления. В настоящее время наиболее широко применяются унифицированные сигналы тока и напряжения. При передаче информации с помощью аналоговых сигналов необ-

ходимость достоверность обеспечивается помехозащищенностью приемопередающих узлов и каналов связи.

### 1.1. Унифицированные сигналы напряжения

Передача информации с помощью унифицированных сигналов напряжения имеет следующие преимущества перед другими способами передачи аналоговой информации:

- низкие требования к нагрузочной способности источника информации;
- возможность подключения произвольного числа приемников к одному источнику;
- отсутствие необходимости применения специализированных приемопередающих узлов.

Вместе с тем, данный способ обладает и определенными недостатками. Рассмотрим основные закономерности передачи аналогового сигнала напряжения от источника приемнику (рис.1.1).

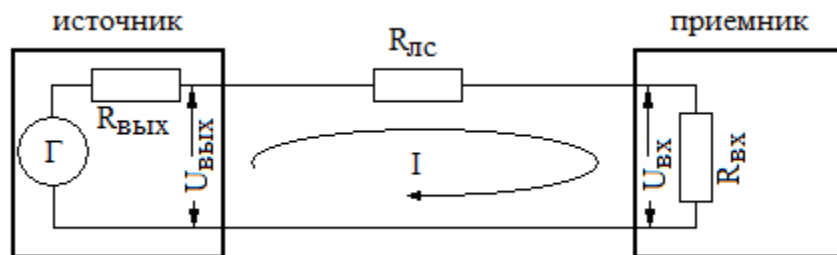


Рис. 1.1. Передача информации с использованием унифицированного сигнала напряжения  
 $R_{\text{вых}}$  – выходное сопротивление источника;  $R_{\text{вх}}$  – входное сопротивление приемника;  $R_{\text{лс}}$  – сопротивление линии связи;  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение источника;  $U_{\text{вх}}$  – входное напряжение приемника;  $I$  – ток в цепи передачи сигнала

Максимальная достоверность передачи информации в данном случае должна обеспечивать равенство:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вых}}, \quad (1.1)$$

однако на практике такое возможно только при нулевом выходном сопротивлении источника и нулевом сопротивлении линии связи. В действительности же указанные сопротивления хотя и малы, но имеют конечные значения, к тому же изменяющиеся в зависимости от внешних условий (например, температуры). Таким образом, входное напряжение приемника будет определяться соотношением:

$$U_{\text{вх}} = IR_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{лс}} + R_{\text{вх}}} R_{\text{вх}}. \quad (1.2)$$

Разделив числитель и знаменатель соотношения (1.2) на  $R_{\text{вх}}$  получим:

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{\frac{R_{\text{вых}} + R_{\text{лс}}}{R_{\text{вх}}} + 1}. \quad (1.3)$$

Из уравнения (1.3) следует, что погрешность передачи сигналов напряжения будет уменьшаться с ростом  $R_{вх}$  и снижением  $R_{вых}$  и  $R_{лс}$ . Кроме того, необходимо отметить, что повышение  $R_{вх}$  ослабляет помехозащищенность приемника по отношению к внешним электромагнитным полям и снижает быстродействие при передаче информации, так как увеличивается время перезарядки паразитной входной емкости приемника.

Указанные недостатки ограничивают область применения унифицированных сигналов напряжения передачей информации на относительно короткие расстояния (до нескольких метров) и вызывают необходимость принятия специальных мер по повышению помехозащищенности приемника (экранирование линий связи и др.).

## 1.2. Унифицированные токовые сигналы

Способ передачи информации с помощью унифицированных токовых сигналов свободен от недостатков, присущих сигналам напряжения. данный способ (рис.1.2) устраняет влияние сопротивления линии связи на точность передачи информации.

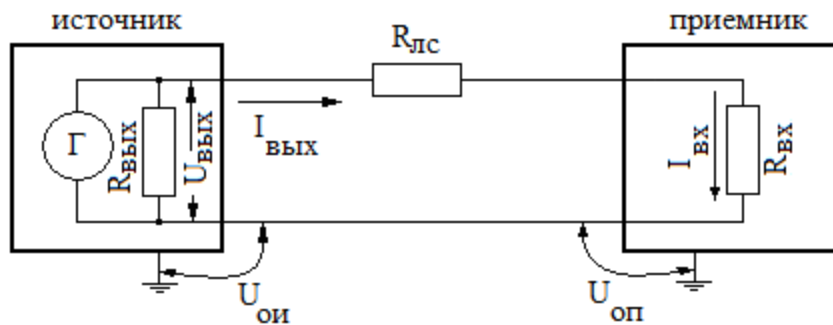


Рис. 1.2. Передача информации с использованием унифицированного токового сигнала  
 $R_{вых}$  – выходное сопротивление источника;  $R_{вх}$  – входное сопротивление приемника;  $R_{лс}$  – сопротивление линии связи;  $I_{вых}$  – выходной ток источника;  $I_{вх}$  – входной ток приемника;  $U_{вых}$  – выходное напряжение источника;  $U_{ои}$  – потенциал нулевого провода источника;  $U_{оп}$  – потенциал нулевого провода приемника

Поскольку ток во всех точках замкнутой цепи имеет одно и то же значение, входной ток источника всегда будет равен выходному току приемника, независимо от сопротивления линии связи. В то же время, сумма  $R_{вх} + R_{лс}$  должна быть такой, чтобы источник тока мог обеспечить формирование токового сигнала на уровне верхнего предельного значения:

$$R_{вх} + R_{лс} \leq \frac{U_{вых}^{max}}{I_{вых}^{max}}, \quad (1.4)$$

где  $U_{вых}^{max}$  – максимально возможное выходное напряжение источника и

$I_{вых}^{max}$  – верхний предел унифицированного токового сигнала.

Другой особенностью данного способа передачи информации является возможность возникновения "продольных" помех. Если потенциалы нулевых проводов источника и приемника различны, то при их соединении в линии связи возникает паразитный ток, воспринимаемый приемником как полезный сигнал:

$$I_n = \frac{|U_{ou} - U_{on}|}{R_{лс}} \quad (1.5)$$

Для устранения продольных помех необходимо разорвать гальваническую связь между источником и приемником. Эта задача решается с использованием специальных узлов гальванического (кондуктивного) разделения, несколько усложняющих схемные решения источников и приемников. В системах контроля и управления унифицированные токовые сигналы применяются для передачи аналоговой информации на значительные расстояния – до нескольких километров.

При передаче информации с помощью токового сигнала от одного источника к нескольким приемникам все приемники должны быть соединены последовательно (рис.1.3).



Рис. 1.3. Передача токового сигнала к нескольким приемникам

При этом обрыв цепи у одного из приемников означает прекращение передачи информации и всем остальным приемникам, входные цепи которых

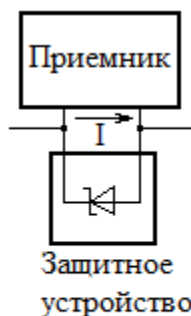


Рис. 1.4. Защита входа приемника от обрыва цепи

исправны. Для предотвращения таких отказов входные цепи приемников токового сигнала шунтируют защитными устройствами, представляющими собой низковольтные стабилитроны (рис 1.4). При обрыве входной цепи приемника стабилитрон защитного устройства пробивается, и ток в цепи последовательно соединенных приемников возобновляется.



### **1.3. Импульсно-модулированные сигналы**

При передаче информации с помощью импульсно-модулированных сигналов изменение несущей величины во времени представляет собой последовательность импульсов, параметры которых могут меняться в некотором непрерывном диапазоне. Для амплитудно-импульсной модуляции таким параметром является амплитуда импульсов, для широтно-импульсной – длительность и для фазоимпульсной – фазовый сдвиг относительно некоторой опорной последовательности. Применение импульсно-модулированных сигналов позволяет повысить соотношение полезный сигнал/шум и, тем самым, улучшить помехозащищенность приемников информации. В системах управления импульсно-модулированные сигналы используются для передачи информации между функциональными блоками систем, а также внутри функциональных блоков между отдельными узлами.

### **1.4. Дискретные двоичные сигналы**

Двоичные дискретные сигналы используются в системах сигнализации и логического управления для передачи информации от сигнализаторов к управляющим устройствам и от управляющих устройств к дискретным исполнительным устройствам. В качестве несущей величины двоичных сигналов может использоваться как ток, так и напряжение. Особенности передачи информации аналоговых и дискретных сигналов одинаковы – токовые сигналы могут быть использованы для передачи информации на значительные расстояния, но предполагают гальваническое разделение приемника и источника, Сигналы напряжения не требуют применения специальных приемопередающих узлов, но обеспечивают требуемую достоверность передачи только на относительно малых расстояниях.

### **1.5. Унифицированные цифровые сигналы**

Унифицированные цифровые сигналы используются в системах контроля и управления для передачи информации между управляющими устройствами и другими функциональными блоками системы (например, интеллектуальными модулями ввода – вывода ). Важнейшими характеристиками цифровых сигналов являются способ кодирования информации и способ синхронизации передачи данных. Для передачи цифровой информации преимущественно применяют параллельные, последовательные и последовательно-параллельные двоичные коды. Последовательный способ обмена предполагает последовательную передачу всех разрядов цифрового кода от старшего к младшему по одной линии связи.

Параллельный обмен подразумевает одновременную передачу всех разрядов двоичного кода, но число линий связи в шине, по которой производится обмен, должно соответствовать разрядности передаваемых сообщений. При последовательно-параллельном кодировании сообщение форматом в  $n$  бит

делится на  $m$  групп по  $k$  бит в каждой  $m \cdot k = n$ . Все  $k$  разрядов одной группы передаются одновременно, а группы следуют друг за другом от старших разрядов сообщения к младшим.

По способу синхронизации различают синхронные и асинхронные цифровые сигналы. Передача информации с помощью синхронного сигнала осуществляется в фиксированные моменты времени, определяемые вспомогательными синхросигналами. Эффективное использование синхронных цифровых сигналов возможно только в том случае, когда все функциональные блоки системы имеют одинаковое быстродействие. В противном случае целесообразно использовать асинхронные цифровые сигналы, с помощью которых информация передается в произвольные моменты времени, определяемые готовностью функциональных блоков.

С целью повышения достоверности передачи информации и помехозащищенности каналов связи довольно часто используют двухполярные самосинхронизирующиеся коды (рис.1.5).

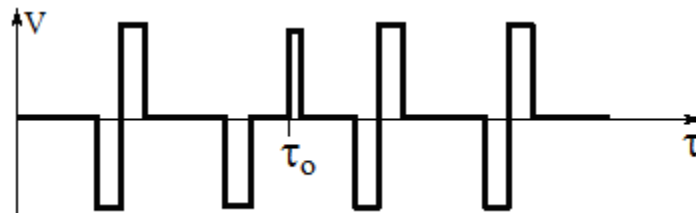


Рис. 1.5. Передача данных с помощью самосинхронизирующегося кода

В данной последовательности импульсы положительной полярности являются информационными, а отрицательной – синхронизирующими. Информационные импульсы, не сопровождаемые синхронизирующими, считаются ложными и игнорируются приемником. Таким образом, появление в момент времени  $\tau_0$  помехи не внесет искажений в принятую информацию.

## 1.6. Унифицирующие преобразователи

Устройства, выполняющие преобразования измеряемых физических величин в унифицированные сигналы, называются унифицирующими преобразователями. В системах управления унифицирующие преобразователи являются связующим звеном между чувствительными элементами датчиков и устройствами обработки информации. Различают унифицирующие преобразователи классического типа и унифицирующие преобразователи на базе микропроцессорных контроллеров. Структура классического унифицирующего преобразователя приведена на рис.1.6.

Измерительная схема преобразует измеряемую величину в напряжение, которое усиливается МДМ-усилителем, состоящим из модулятора, усилителя и демодулятора, и поступает в узел кондуктивного разделения, где преобразуется в унифицированный токовый сигнал.

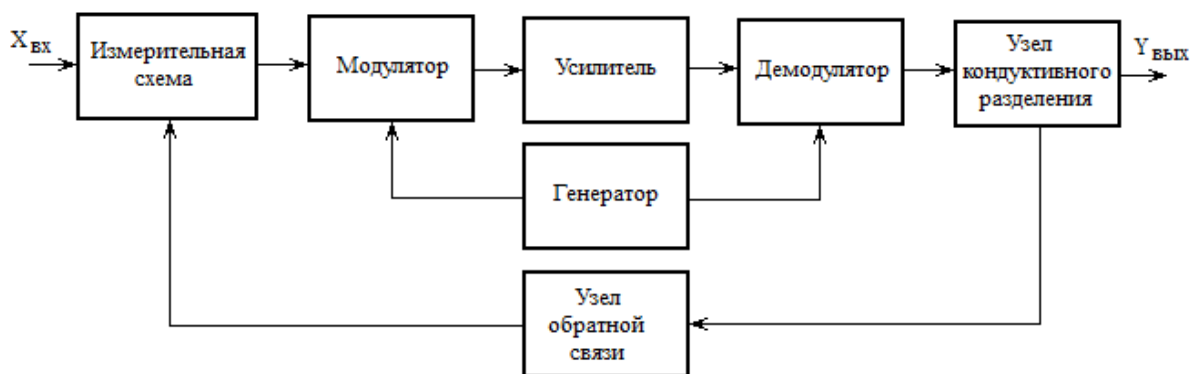


Рис. 1.6. Унифицирующий преобразователь классического типа

Генератор обеспечивает питание модулятора и демодулятора прямоугольными импульсами напряжения с частотой 1000 Гц, а узел обратной связи линеаризует статическую характеристику преобразователя.

Структура унифицирующего преобразователя на основе микропроцессорного контроллера приведена на рис. 1.7.

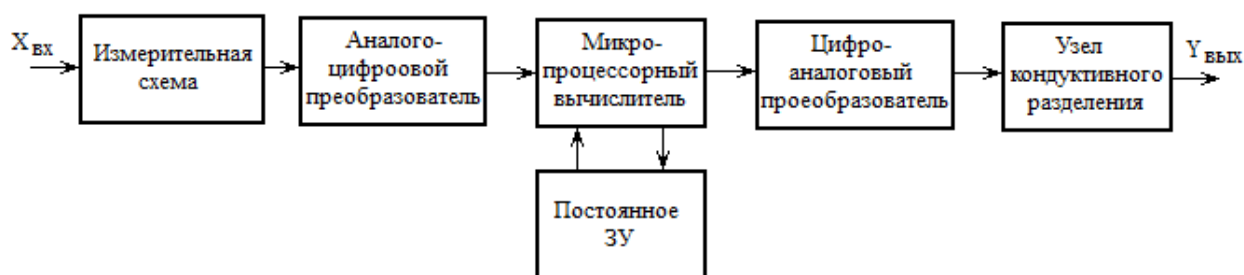


Рис. 1.7. Унифицирующий преобразователь на базе микропроцессорного контроллера

Выходное напряжение измерительной схемы преобразуется аналого-цифровым преобразователем в цифровой код, который обрабатывается микропроцессорным вычислителем по программе, хранящейся в постоянном запоминающем устройстве. Результат обработки преобразуется цифро-аналоговым преобразователем в постоянное напряжение, из которого узел кондуктивного разделения формирует унифицированный токовый сигнал. Достоинствами данного варианта преобразователя являются универсальность и многофункциональность: благодаря легко перестраиваемому алгоритму обработки информации преобразователь может обслуживать датчики с различными градуировками и пределами измерения. Кроме того, микропроцессорный вычислитель может передавать информацию в систему управления непосредственно в цифровом виде, что существенно упрощает организацию обмена информацией между датчиками и управляющим устройством, а также повышает помехозащищенность каналов связи.

## 2. Технические средства локальных систем регулирования и управления

### 2.1. Принципы построения электронных регуляторов

Электронные системы аналогового регулирования могут включать в себя исполнительные устройства с различными динамическими свойствами. В связи с этим, регулирующие устройства электронных систем могут строиться с использованием двух принципов (рис. 2.1). В обоих случаях основной частью регулятора является пропорциональное звено с высоким коэффициентом передачи  $K_N$ , позволяющее формировать закон регулирования с помощью функциональной обратной связи.

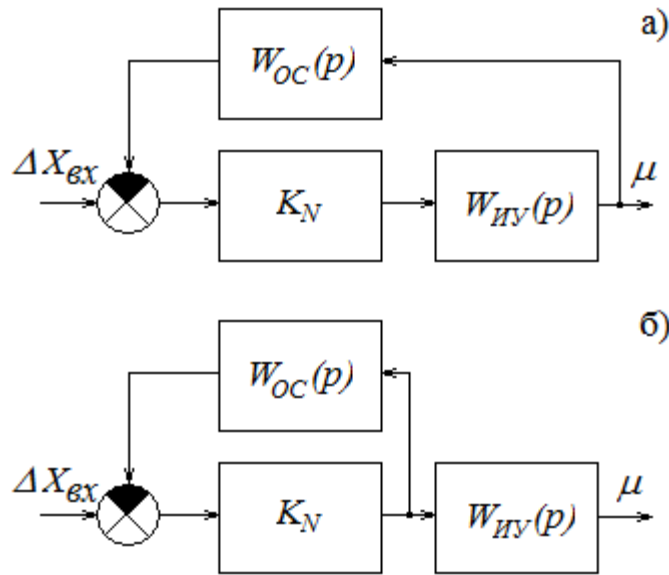


Рис. 2.1. Принципы построения электронного регулятора (а) с обратной связью в исполнительной части; (б) с обратной связью в регулирующей части:

$\Delta X_{ex}$  - входное рассогласование;  
 $\mu$  - регулирующее воздействие

Если обратная связь охватывает регулирующую и исполнительную части системы (рис. 2.1, а) то динамика исполнительного устройства не оказывает существенного влияния на формируемый закон регулирования, который определяется только передаточной функцией звена обратной связи  $W_{OC}(p)$  и не зависит от передаточной функции исполнительного устройства  $W_{ИУ}(p)$ . Продemonстрируем это на примере реализации ПИ-

алгоритма регулирования со связанными настройками :

$$W_P(p) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_u p}\right). \quad (2.1)$$

Согласно структуре, приведенной на рис. 2.1, а, передаточная функция регулятора будет иметь вид:

$$W_P(p) = \frac{K_N W_{ИУ}(p)}{1 + K_N W_{ИУ}(p) W_{OC}(p)} \quad \text{или, поскольку } K_N \gg 1, \quad W_P(p) \approx \frac{1}{W_{OC}(p)}. \quad (2.2)$$

Таким образом, данный принцип построения регулятора исключает влияние исполнительного устройства на алгоритм регулирования. Согласно (2.1) и (2.2) звено обратной связи регулятора должно обладать передаточной функцией:

$$W_{OC}(p) = \frac{1}{W_P(p)} = \frac{T_u p}{K_P (T_u p + 1)}. \quad (2.3)$$

Данный способ построения регулятора обеспечивает инвариантность системы к свойствам исполнительного устройства, однако обладает и некоторыми недостатками. Основным недостатком здесь является необходимость обеспечения информационной совместимости регулятора по входу и выходу. С учетом того, что входной и выходной сигналы регулятора могут иметь не только различный вид модуляции, но и разную несущую величину, данная задача не всегда имеет простое решение. Поэтому в практике построения электронных регуляторов чаще используют другой принцип (рис.2.1, б).

Здесь исполнительное устройство принимает непосредственное участие в формировании закона регулирования. С использованием данного принципа реализация уравнения (2.1) приводит к следующей передаточной функции регулятора:

$$W_P(p) = \frac{K_N}{1 + K_N W_{OC}(p)} W_{ИУ}(p) \approx \frac{W_{ИУ}(p)}{W_{OC}(p)}. \quad (2.4)$$

Если в системе используется пропорциональное исполнительное устройство с коэффициентом передачи  $K_{ИУ}$ , то регулирующий блок должен обладать передаточной функцией:

$$W_{РБ}(p) = \frac{K_P}{K_{ИУ}} \left(1 + \frac{1}{T_u p}\right), \quad (2.5)$$

и передаточная функция звена обратной связи будет отличаться от (2.3) только масштабом:

$$W_{OC}(p) = \frac{1}{W_P(p)} = \frac{K_{ИУ} T_u p}{K_P (T_u p + 1)}. \quad (2.6)$$

Если же исполнительное устройство обладает интегрирующими свойствами:  $W_{OC}(p) = \frac{1}{T_{ИУ} p}$ , то регулирующий блок должен обладать передаточной функцией:

$$W_{РБ}(p) = \frac{K_P T_{ИУ}}{T_u} (1 + T_u p), \quad (2.7)$$

и передаточная функция звена обратной связи примет вид:

$$W_{OC}(p) = \frac{1}{W_{РБ}(p)} = \frac{T_u}{K_P T_{ИУ} (T_u p + 1)}. \quad (2.8)$$

Соотношения (2.7) и (2.8) позволяют заключить, что в данном случае для реализации ПИ-закона (2.1) регулирующий блок должен обрабатывать ПД-алгоритм (2.7), а звено обратной связи должно обладать свойствами апериодического звена 1-го порядка (2.8) с постоянной времени  $T_u$  и коэффициентом передачи  $\frac{T_u}{K_P T_{ИУ}}$ .

## 2.2. Принципы управления исполнительными механизмами постоянной скорости

В электронных системах аналогового регулирования наиболее часто используются исполнительные устройства постоянной скорости. Электрические исполнительные механизмы постоянной скорости предназначены для совместной работы с электронными регуляторами и строятся на основе асинхронных трехфазных или специальных двухфазных электродвигателей. Обобщенная структурная схема однооборотного исполнительного механизма типа МЭО приведена на рис. 2.2.

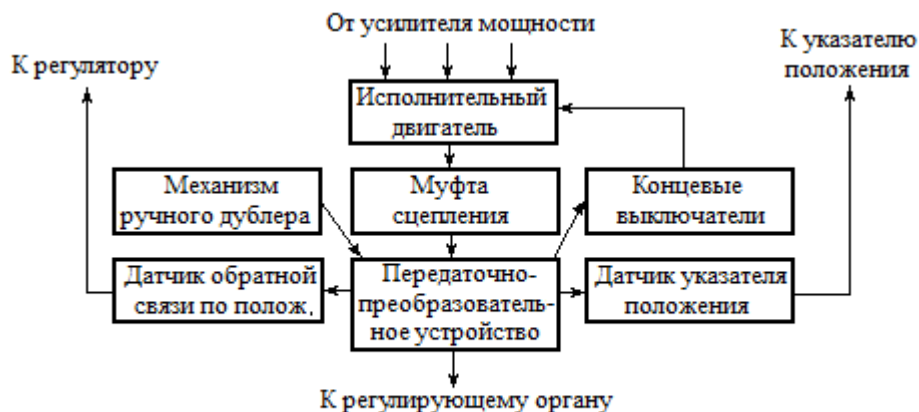


Рис. 2.2. Обобщенная структура однооборотного исполнительного механизма

Исполнительный двигатель служит источником силового воздействия на регулирующий орган; передаточное или преобразовательное устройство обеспечивает определенную скорость и направление перемещения; концевые выключатели ограничивают ход исполнительного механизма и защищают его от повреждения при достижении крайних положений; датчик обратной связи по положению служит для коррекции алгоритмов регулирования по положению регулирующего органа; датчик указателя положения используется для индикации положения регулирующего органа; ручной дублер служит для изменения положения регулирующего органа вручную при отключенном регуляторе.

Принципы управления такими исполнительными устройствами существенно отличаются от принципов управления пропорциональными исполнительными устройствами на основе мембранных или поршневых пневмоприводов. Одна из особенностей исполнительных механизмов постоянной скорости – существенная нелинейность статической характеристики. Скорость перемещения исполнительного механизма на основе электродвигателя может принимать лишь два значения – 0, когда электродвигатель выключен и  $\pm S_{max}$ , когда электродвигатель включен. Вместе с тем, для реализации алгоритмов аналогового регулирования необходимо, чтобы скорость перемещения исполнительного устройства можно было изменять в непрерывном диапазоне  $[0, \pm S_{max}]$ . Это достигается при переходе от мгновенной скорости перемещения исполнительного устройства к средней и от непрерывного управления к импульсному.

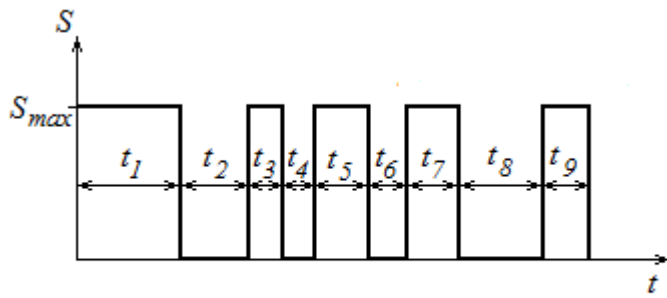


Рис. 2.3. Импульсное управление исполнительным механизмом

Рассмотрим диаграмму импульсного управления исполнительным механизмом (рис. 2.3). В течение промежутков времени  $t_1, t_3, t_5, t_7$  и  $t_9$  электродвигатель исполнительного механизма включен, в течение промежутков времени  $t_2, t_4, t_6$  и  $t_8$  – выключен. Среднюю скорость перемещения исполнительного механизма можно определить из уравнения:

$$S_{cp} = \frac{t_1 + t_3 + t_5 + t_7 + t_9}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9} S_{max}. \quad (2.9)$$

Доля времени, в течение которого двигатель исполнительного механизма включен,

$$\gamma = \frac{t_1 + t_3 + t_5 + t_7 + t_9}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9}, \quad (2.10)$$

называется *скважностью* и играет роль выходного параметра регулятора.

Таким образом, связь между мгновенной и средней скоростью перемещения исполнительного механизма при импульсном управлении выражается соотношением:

$$S_{cp} = \gamma S_{max}. \quad (2.11)$$

Поскольку скважность  $\gamma$  может изменяться в непрерывном диапазоне  $[0,1]$ , средняя скорость  $S_{cp}$  изменяется в непрерывном диапазоне  $[0, S_{max}]$ .

Второй особенностью управления исполнительными механизмами постоянной скорости являются специфические требования к статической характеристике регулятора. Она должна обеспечивать релейное реверсивное управление исполнительным механизмом в отсутствие неопределенностей в точках переключения. Этим условиям удовлетворяет релейная характеристика с зоной нечувствительности  $\Delta_n$  и двумя зонами возврата  $\Delta_\epsilon$  (рис. 2.4). В пределах зоны нечувствительности  $\Delta_n$  регулятор не реагирует на изменение входного рассогласования  $\Delta X_{ex}$ . В пределах зон возврата  $\Delta_\epsilon$  регулятор не изменяет состояния исполнительного механизма – последний либо остановлен, либо продолжает движение в заданном направлении.

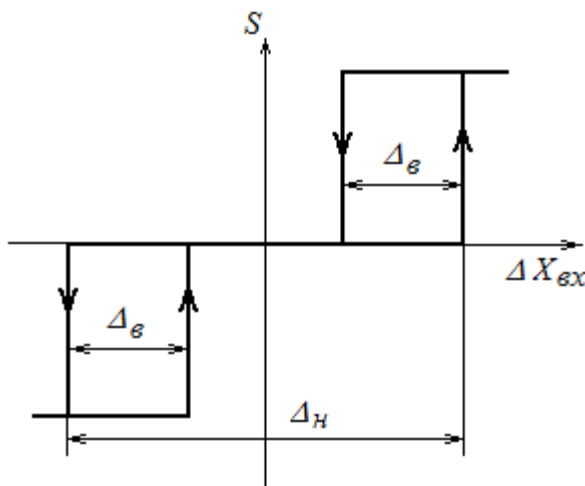


Рис. 2.4. Статическая характеристика релейно-импульсного регулятора

В пределах зон возврата  $\Delta_\epsilon$  регулятор не изменяет состояния исполнительного механизма – последний либо остановлен, либо продолжает движение в заданном направлении.

Регуляторы, реализующие импульсный принцип управления исполнительным устройством и имеющие релейную статическую характеристику, называются *релейно-импульсными*. Такой регулятор представляет собой двухканальную релейную схему, формирующую дискретные управляющие сигналы «БОЛЬШЕ» и «МЕНЬШЕ» и обладающую статической характеристикой, приведенной на рис. 2.4. Наименования управляющих сигналов обозначают направления перемещения исполнительного устройства в сторону соответственно открытия и закрытия регулирующего органа.

Технически управление исполнительными механизмами осуществляется с помощью специализированных усилителей мощности – реверсивных пускателей или тиристорных усилителей. На рис. 2.5 представлена схема управления исполнительным механизмом на основе конденсаторного двухфазного электродвигателя с помощью реверсивного пускателя.

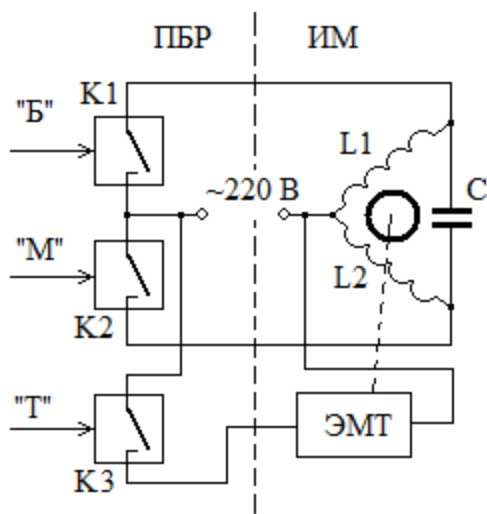


Рис. 2.5. Управление электродвигателем исполнительного механизма с помощью реверсивного пускателя

Реверсивный пускатель содержит три бесконтактных ключа. Ключи **K1** и **K2** управляются внешними дискретными сигналами «БОЛЬШЕ» («Б») и «МЕНЬШЕ» («М»). В отсутствие управляющих сигналов оба ключа разомкнуты, и двигатель исполнительного механизма отключен от питающей сети (остановлен). При поступлении управляющего сигнала «Б» ключ **K1** замыкается, обмотка электродвигателя **L1** подключается к сети непосредственно, а обмотка **L2** будет включена в сеть через фазосдвигающий конденсатор **C**. Двигатель исполнительного механизма будет вращаться в сторону открытия регулирующего органа.

При поступлении управляющего сигнала «М» замыкается ключ **K2**, обмотка электродвигателя **L2** подключается к сети непосредственно, а обмотка **L1** будет включена в сеть через фазосдвигающий конденсатор **C**. Двигатель исполнительного механизма будет вращаться в сторону закрытия регулирующего органа. Одновременное поступление управляющих сигналов «Б» и «М» запрещено. Для улучшения качества позиционирования многие исполнительные механизмы оборудованы муфтой электромагнитного тормоза (ЭМТ), которая фиксирует якорь электродвигателя в отсутствие управляющих сигналов. Управление электромагнитным тормозом осуществляется с помощью ключа **K3** дискретным управляющим сигналом «Т», который формируется регулирующим устройством одновременно с управляющими сигналами «Б» и «М».

Для управления исполнительными механизмами на базе трехфазных электродвигателей используются двухканальные тиристорные усилители или реверсивные пускатели (рис. 2.6). Тиристорный усилитель содержит четыре бесконтактных ключа, объединенных в мостовую схему.

Для управления исполнительными механизмами на базе трехфазных электродвигателей используются двухканальные тиристорные усилители или реверсивные пускатели (рис. 2.6). Тиристорный усилитель содержит четыре бесконтактных ключа, объединенных в мостовую схему.



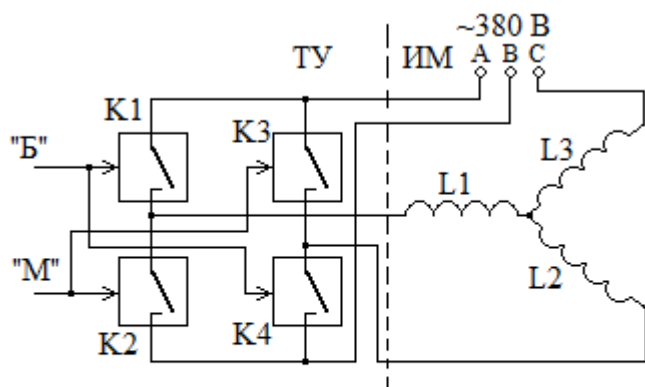


Рис. 2.6. Управление электродвигателем исполнительного механизма с помощью тиристорного усилителя

Питание электродвигателя осуществляется от трехфазной сети напряжением 380 В. Обмотка электродвигателя **L3** постоянно подключена к фазе **C** питающей сети. В отсутствие управляющих сигналов «Б» и «М» все четыре ключа разомкнуты и напряжение на обмотки электродвигателя **L1** и **L2** не поступает – (двигатель остановлен). При поступлении управляющего сигнала «Б» ключи **K1** и **K4** замыкаются, обмотка электродвигателя **L1** подключается к фазе **A**, а обмотка **L2** – к фазе **B** питающей сети. Двигатель исполнительного механизма будет вращаться в сторону открытия регулирующего органа. При поступлении управляющего сигнала «М» замыкаются ключи **K2** и **K3**, обмотка электродвигателя **L2** подключается к фазе **A**, а обмотка **L1** будет подключена к фазе **B**. Двигатель исполнительного механизма будет вращаться в сторону закрытия регулирующего органа. Одновременное поступление управляющих сигналов «Б» и «М», как и в предыдущем случае, запрещено.

Схемы подключения реверсивного пускателя ПБР-2М и исполнительного механизма МЭО-630 приведены на рис. 2.7.

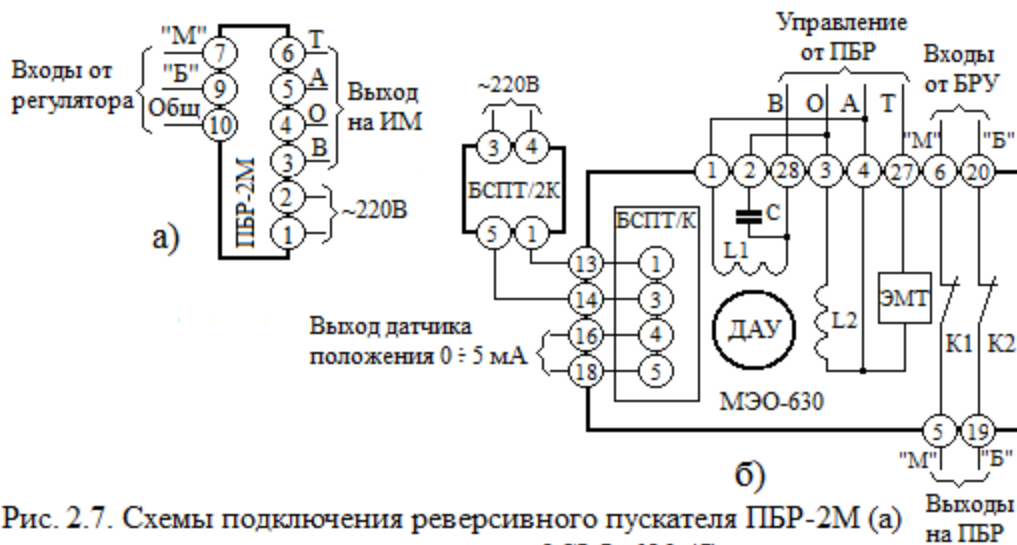


Рис. 2.7. Схемы подключения реверсивного пускателя ПБР-2М (а) и исполнительного механизма МЭО-630 (б)

### 2.3. Устройство и принцип работы релейно-импульсного регулятора

Типовой релейно-импульсный регулятор реализует импульсный принцип управления исполнительным устройством и преобразует входное рассогласование в скважность управляющих импульсов по пропорционально-дифференциальному алгоритму. Структуру и принцип работы регулятора рассмотрим на примере устройства РП-4, входящего в агрегатный комплекс

АКЭСР-2. Данный регулятор выпускается в трех модификациях – РП-4У, РП-4Т и РП-4П. Первая предназначена для работы с датчиками, формирующими унифицированный токовый сигнал, вторая – для работы с датчиками температуры (термопарами и термометрами сопротивления) и третья – для работы с индуктивными датчиками. Перечисленные модификации работают по одному принципу и отличаются только устройством входной измерительной схемы. На рис.2.8 приведена структура регулятора РП-4У.

Регулятор включает в себя следующие узлы:

- УСКР – суммирования и кондуктивного разделения;
- УД – демпфирования;
- УТР – триггеров;
- УВУ – выходных усилителей;
- УОС – обратной связи.

Узел суммирования и кондуктивного разделения УСКР осуществляет суммирование с гальваническим разделением четырех унифицированных токовых сигналов и преобразует результат суммирования в постоянное напряжение. Три входа из четырех являются масштабируемыми с возможностью

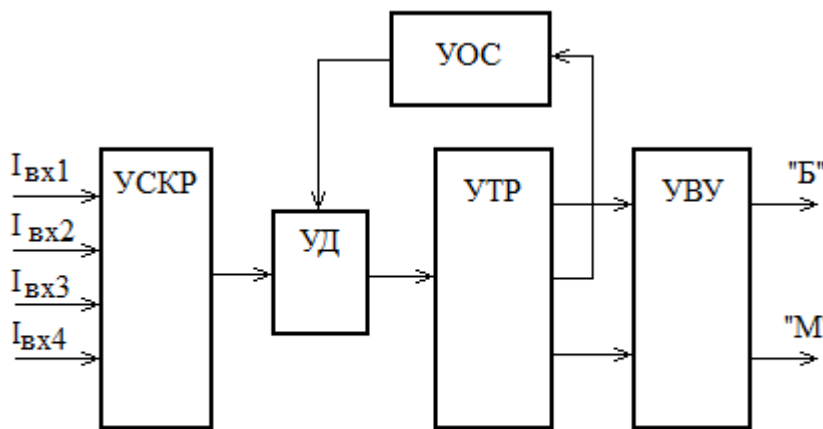


Рис. 2.8. Структура релейно-импульсного регулятора

настройки коэффициента передачи  $0 \leq \alpha_i \leq 1$ . Четвертый немасштабируемый вход предназначен для подключения 100 % токового датчика.

Узел демпфирования УД фильтрует выходной сигнал УСКР от высокочастотных составляющих, появляющихся в результате действия

внешних и внутренних источников помех. В итоге на выходе узла демпфирования формируется отфильтрованный сигнал напряжения, пропорциональный величине входного рассогласования.

Узел триггеров УТР определяет величину и знак входного рассогласования и формирует управляющие сигналы «БОЛЬШЕ» и «МЕНЬШЕ» в соответствии со статической характеристикой, приведенной на рис. 2.4.

Узел обратной связи УОС выполняет функции апериодического звена первого порядка с настраиваемыми значениями коэффициента передачи и постоянной времени. Данный узел организует функциональную обратную связь (рис. 2.1, а), формирующую закон регулирования (2.7).

Узел выходных усилителей УВУ предназначен для согласования выхода регулятора с различными исполнительными устройствами. Узел представляет собой двухканальную ключевую схему, работающую в двух режимах – активном и пассивном. В активном режиме узел формирует дискретные управ-

ляющие сигналы с логическими уровнями 0; 24В. Данный режим используется для управления релейными исполнительными устройствами, магнитными усилителями и т.п. Пассивный режим является параметрическим. В данном режиме используются выходные ключи, которые могут находиться в замкнутом или разомкнутом состоянии. Логической единице в этом случае будет соответствовать замкнутое состояние ключа, а логическому нулю – разомкнутое. Пассивный режим используется для управления электродвигателями исполнительных механизмов с помощью реверсивных пускателей или тиристорных усилителей.

### 2.3.1 Узел суммирования и кондуктивного разделения

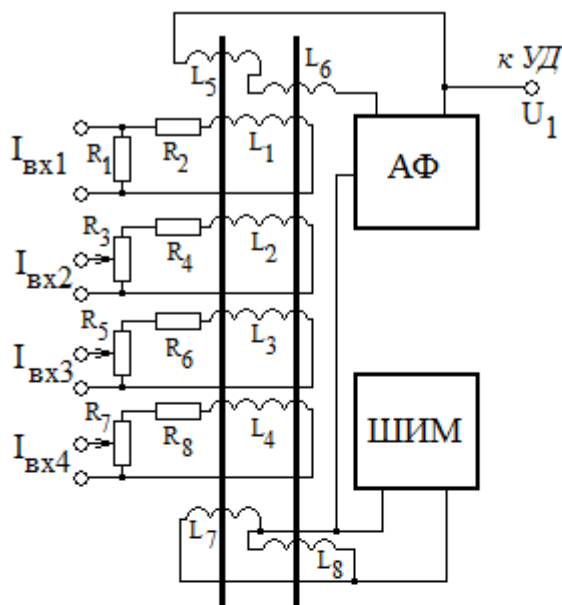


Рис. 2.9. Узел суммирования и кондуктивного разделения

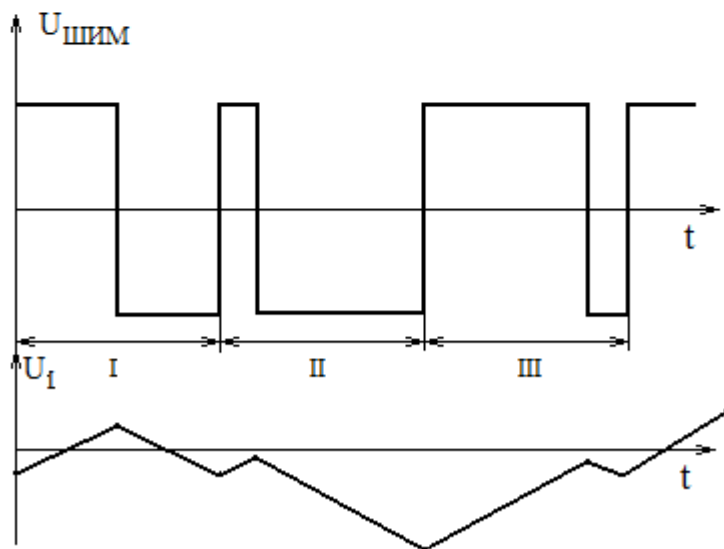


Рис. 2.10. Временная диаграмма широтно-импульсного модулятора

Упрощенная схема узла суммирования и кондуктивного разделения приведена на рис. 2.9. Основным элементом узла является магнитный усилитель, включающий четыре обмотки управления  $L_1 \div L_4$ , две обмотки возбуждения  $L_7, L_8$  и две обмотки обратной связи  $L_5, L_6$ .

На обмотки управления  $L_1 \div L_4$  поступают токовые сигналы от датчиков технологических переменных. Масштабирование тока в обмотках  $L_2 \div L_4$  осуществляется с помощью резисторов  $R_3, R_5$  и  $R_7$ . Обмотки возбуждения  $L_7, L_8$  подключены к

широтно-импульсному модулятору ШИМ, работающему в автоколебательном режиме и формирующему на выходе прямоугольные колебания напряжения с постоянной амплитудой и постоянным периодом. Соотношение длительностей положительной и отрицательной полувольт определяется величиной и знаком суммарного тока, протекающего через обмотки управления. Если величина суммарного тока находится в пределах зоны нечувствительности,

то длительности положительной и отрицательной полувольт будут одинаковы (участок I на рис. 2.10), и среднее значение  $U_{\text{ШИМ}}$  будет близко к

нулю. При выходе суммарного тока за пределы зоны нечувствительности в отрицательную или положительную сторону на диаграмме будет преобладать длительность соответственно отрицательной или положительной полуволны (участки II и III на рис. 2.10). Активный фильтр АФ, работающий по принципу интегратора, выделяет из выходного сигнала ШИМ постоянную составляющую  $U_1$  (рис. 2.10). Это напряжение подается на выход узла и на обмотки обратной связи  $L_5, L_6$ . Последние стабилизируют коэффициент передачи узла на уровне  $K_{ex}$ . В целом, статическая характеристика узла приближенно описывается уравнением:

$$U_1 = K_{ex} (I_{ex1} + \alpha_2 I_{ex2} + \alpha_3 I_{ex3} + \alpha_4 I_{ex4}), \quad (2.12)$$

где  $\alpha_2, \alpha_3$  и  $\alpha_4$  – масштабные коэффициенты по соответствующим входам, устанавливаемые резисторами  $R_3, R_5$  и  $R_7$ .

### 2.3.2. Узел демпфирования

Упрощенная схема узла демпфирования приведена на рис. 2.11. Узел построен на операционном усилителе А1 с инерционным звеном  $R_1C$  на входе. Усилитель охвачен отрицательной обратной связью совместно с узлом триггеров. Наличие на входе усилителя инерционного звена с постоянной времени  $T_\phi = R_1C$  придает узлу фильтрующие свойства, но, вместе с тем, в закон регулирования принудительно вводится динамическая погрешность в виде инерционности с постоянной

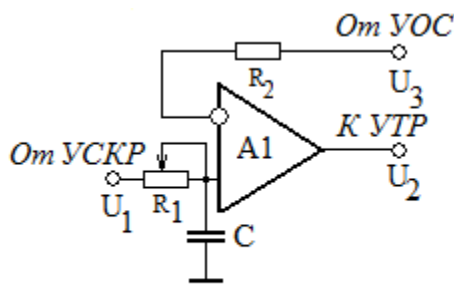


Рис. 2.11. Узел демпфирования

времени  $T_\phi$ .

### 2.3.3. Узел триггеров

Упрощенная схема узла триггеров приведена на рис. 2.12. Узел включает в себя входной делитель  $R_1 \div R_8$ , два операционных усилителя А1, А2 и выходной делитель  $R_9, R_{10}, VD1, VD2$ . Оба операционных усилителя охвачены положительной обратной связью и работают в триггерном режиме. Во входном делителе определяются величина и знак сигнала рассогласования, поступающего от узла демпфирования. С помощью резистора  $R_7$  настраивается ширина зоны нечувствительности  $\Delta_n$ . Если рассогласование не превышает половины зоны нечувствительности, то оба триггера находятся в состоянии «логического нуля», и управляющие сигналы «Б» и «М» отсутствуют.

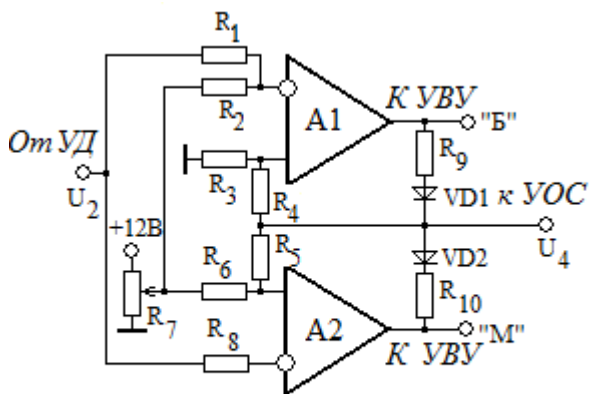


Рис. 2.12. Узел триггеров

Если рассогласование не превышает половины зоны нечувствительности, то оба триггера находятся в состоянии «логического нуля», и управляющие сигналы «Б» и «М» отсутствуют.

Если рассогласование выходит за пределы зоны нечувствительности, то в зависимости от знака рассогласования один из триггеров устанавливается в состояние «логической единицы», и формируется один из управляющих сигналов «Б» или «М». Управляющие сигналы передаются на узел выходных усилителей и через выходной делитель  $R_9, R_{10}, VD1, VD2$  – на вход узла обратной связи. Выходной делитель включает в себя нелинейные элементы – полупроводниковые диоды  $VD1$  и  $VD2$ . За счет некоторой нелинейности в канале обратной связи на статической характеристике регулятора формируются зоны возврата  $\Delta_e$  (рис. 2.4). Эти зоны имеют фиксированную ширину.

### 2.3.4. Узел выходных усилителей

Упрощенная схема узла выходных усилителей приведена на рис. 2.13.

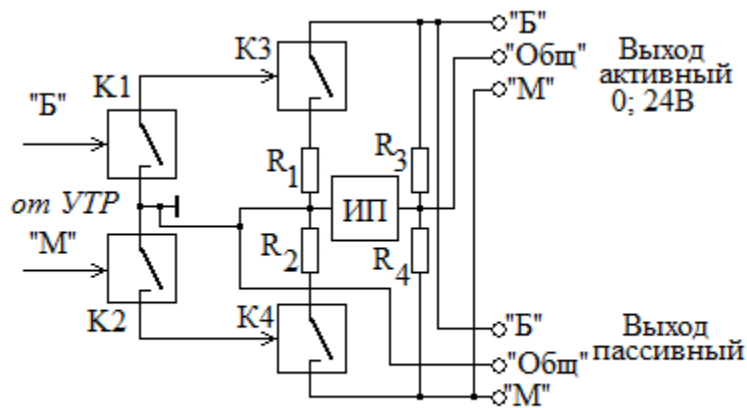


Рис. 2.13. Узел выходных усилителей

Схема включает в себя два независимых двухкаскадных канала  $K1, K3$  и  $K2, K4$ . Ключи  $K1$  и  $K2$  играют роль вспомогательных.

Логические уровни активного выхода определяются параметрами дополнительного источника питания ИП.

При поступлении управляющего сигнала «Б» замыкаются ключи  $K1$  и  $K3$ . На активный выход «Б» подается напряжение 24В. Пассивный выход «Б» замыкается на нулевой провод.

При поступлении управляющего сигнала «М» замыкаются ключи  $K2$  и  $K4$ . Напряжение 24В подается на активный выход «М», а пассивный выход «М» замыкается на нулевой провод.

### 2.3.5. Узел обратной связи

Согласно (2.8), узел обратной связи (рис. 2.14) представляет собой инерционное звено, построенное на операционном усилителе, с регулируемым коэффициентом передачи и постоянной времени.

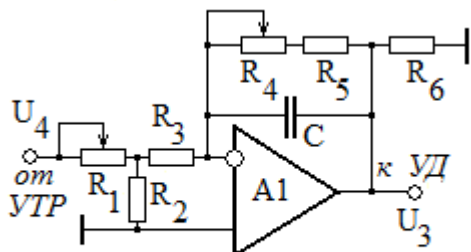


Рис. 2.14. Узел обратной связи

Коэффициент передачи узла обратной связи настраивается резистором  $R_1$ , а постоянная времени – резистором  $R_4$ .

### 2.3.6. Реакция релейно-импульсного регулятора на ступенчатое входное рассогласование

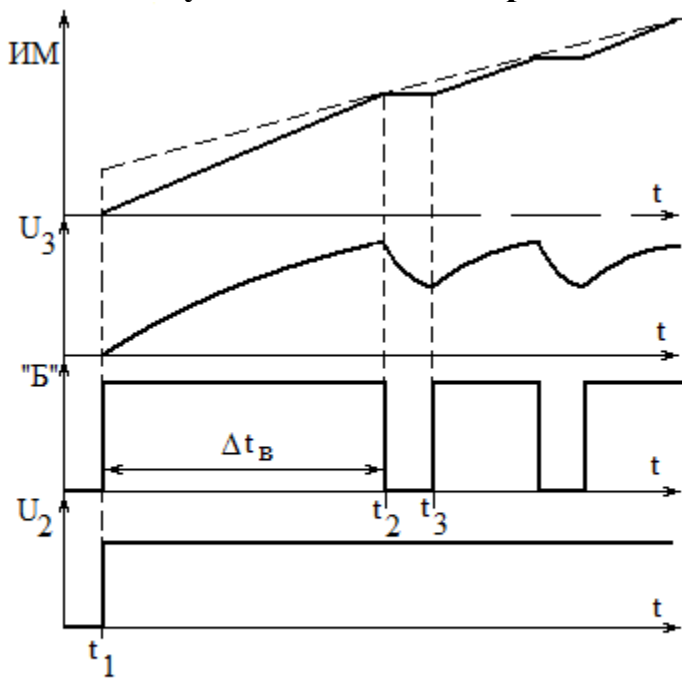


Рис. 2.15. Реакция регулятора на ступенчатое рассогласование

Временная диаграмма реакции регулятора на ступенчатое входное рассогласование приведена на рис. 2.15. В момент времени  $t_1$  на вход регулятора поступает положительное ступенчатое рассогласование, превышающее по амплитуде половину зоны нечувствительности  $\Delta_n/2$ . Возмущение идентифицируется узлом триггеров, который формирует управляющий сигнал «БОЛЬШЕ». Этот сигнал через узел выходных усилителей подается на исполнительный механизм и приводит его в движение (верхний график на рис. 2.15). Одновременно с этим, управ-

ляющий сигнал через выходной делитель узла триггеров подается на вход узла обратной связи, выходное напряжение которого  $U_3$  начинает изменяться по экспоненциальному закону. В момент времени  $t_2$  сигнал обратной связи  $U_3$  компенсирует входное рассогласование, управляющий сигнал «БОЛЬШЕ» снимается, и исполнительный механизм останавливается. Начиная с этого

момента, выходное напряжение узла обратной связи  $U_3$  будет падать по экспоненциальному закону, и в момент времени  $t_3$  разность рассогласования и сигнала обратной связи снова выходит за пределы зоны нечувствительности. Далее цикл повторяется, и на выходе регулятора формируется последовательность управляющих импульсов со скважностью, определяемой соотношением (2.7).

Из рис. 2.15 видно, что регулятор в комплекте с исполнительным механизмом постоянной скорости реализует ПИ-закон приближенно (реакция идеального непрерывного регулятора обозначена пунктиром). Время компенсации  $\Delta t_в$  входного рассогласования сигналом обратной связи опреде-

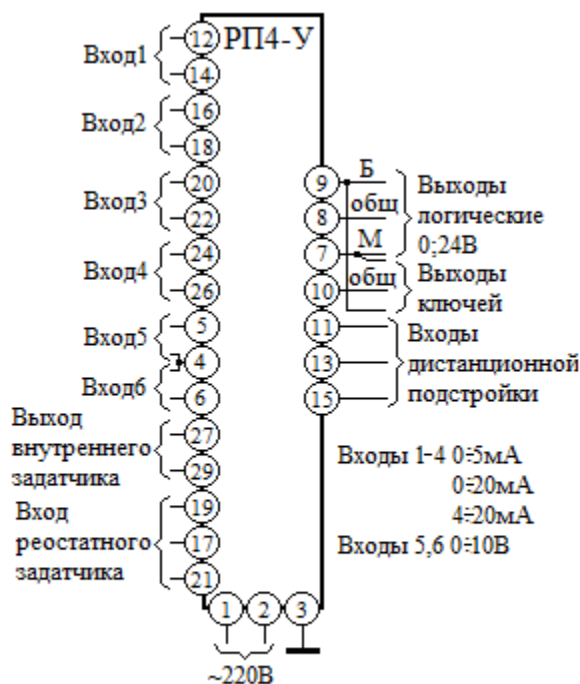


Рис. 2.16. Схема подключения регулятора РП4-У

ляет настройку пропорциональной составляющей закона регулирования, называемую «скоростью связи»:

$$V_{св} = \frac{U}{\Delta t_{\epsilon}}. \quad (2.13)$$

При этом, коэффициент передачи в соотношении (2.1) можно определить из выражения:

$$K_P = \frac{S_{\max}}{V_{св}}. \quad (2.14)$$

Схема подключения регулятора РП-4У приведена на рис. 2.16.

### 2.3.7. Реализация типовых законов системами регулирования на базе релейно-импульсных регуляторов

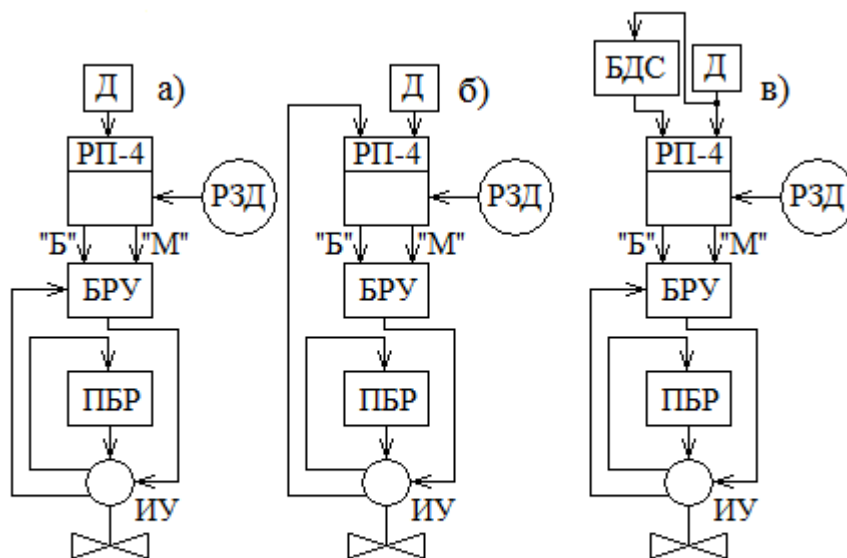


Рис. 2.17. Системы регулирования, реализующие ПИ (а), П (б) и ПИД (в) алгоритмы регулирования

Структура систем регулирования, построенных на базе релейно-импульсных регуляторов и реализующих типовые законы регулирования, представлена на рис. 2.17. Точковый сигнал, пропорциональный текущему значению регулируемого параметра, формируется датчиком Д и поступает на вход регулятора. Заданное

значение регулируемого параметра устанавливается внутренним задатчиком регулятора и может корректироваться в пределах  $\pm 5\%$  внешним реостатным задатчиком РЗД. Управляющие сигналы «Б» и «М» с выходов регулятора передаются на входы блока ручного управления БРУ.

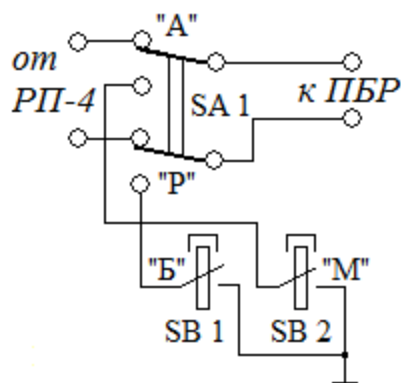


Рис. 2.18. Блок ручного управления

Упрощенная схема БРУ приведена на рис. 2.18. Блок ручного управления производит выбор режима работы системы регулирования и организует ручное дистанционное управление исполнительным устройством. При установке переключателя SA1 в положение «А» входы реверсивного пускателя ПБР коммутируются с выходами регулятора, и обрабатывается режим автоматического регулирования. При установке SA1

в положение «Р» управляющие сигналы поступают на входы реверсивного пускателя от кнопок SB1 и SB2, и обрабатывается режим ручного дистанционного управления. Схема подключения блока БРУ-42 приведена на рис. 2.19.

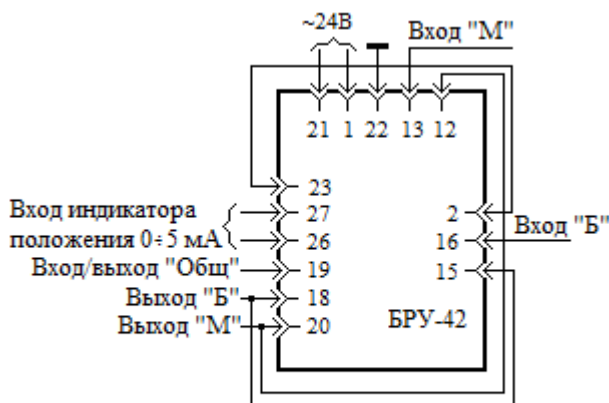


Рис. 2.19. Схема подключения блока ручного управления БРУ-42

При установке исполнительного механизма в крайние положения требование регулятора продолжать движение в том же направлении может вызвать аварийную ситуацию. Для предотвращения этого управляющие сигналы «Б» и «М» с выходов БРУ передаются на входы ПБР через концевые выключатели исполнительного механизма. При установке исполнительного механизма в одно из крайних положений выключатель замыкается, и прохождение соответствующего управляющего сигнала будет запрещено. Датчик положения исполнительного механизма формирует унифицированный токовый сигнал, пропорциональный по величине перемещению регулирующего органа относительно начального положения. Этот сигнал может передаваться в БРУ на встроенный индикатор положения (рис. 2.17,а,в) или же используется для организации обратной связи по положению регулирующего органа (рис. 2.17,б).

Система регулирования, структура которой приведена на рис.2.17,а, реализует ПИ-алгоритм регулирования. Передаточная функция, соответствующая данному закону регулирования, будет иметь вид:

$$W_P(p) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_u p}\right) \frac{1}{T_\phi p + 1}, \quad (2.15)$$

где  $T_\phi$  – постоянная времени узла демпфирования регулятора.

Для преобразования ПИ-алгоритма регулирования в П-алгоритм в системе организуется жесткая обратная связь по положению регулирующего органа (рис. 2.17,б). При этом сигнал с выхода датчика положения исполнительного механизма подается на вход регулятора с масштабным коэффициентом  $K_{вх}$ . Передаточная функция, соответствующая П-алгоритму регулирования, будет иметь вид:

$$W_P(p) = \frac{K_P \left(1 + \frac{1}{T_u p}\right) \frac{1}{T_\phi p + 1}}{1 + K_{вх} K_P \left(1 + \frac{1}{T_u p}\right) \frac{1}{T_\phi p + 1}}. \quad (2.16)$$

Если установить  $K_P \gg 1$ , то выражение (2.16) вырождается в следующее:

$$W_P(p) = \frac{1}{K_{вх}}. \quad (2.17)$$



Таким образом, при реализации П-алгоритма регулирования в качестве коэффициента передачи регулятора будет выступать масштабный коэффициент по входу обратной связи  $K_{ex}$ .

Для реализации ПИД-алгоритма регулирования в системе используется дополнительное устройство – многофункциональный блок динамической связи БДС (рис. 2.17,в). В данной схеме блок БДС выполняет функции реального дифференцирующего звена и отрабатывает передаточную функцию:

$$W_{БДС}(p) = \frac{K_0 T_0 p}{T_0 p + 1}. \quad (2.18)$$

Передаточная функция, соответствующая ПИД-алгоритму регулирования, будет иметь вид:

$$W_p(p) = K_p \frac{1}{T_f p + 1} \left( 1 + \frac{1}{T_u p} + \frac{K_0 T_0 p}{T_0 p + 1} + \frac{K_0 T_0}{T_u (T_0 p + 1)} \right). \quad (2.19)$$

Из (2.19) можно заключить, что ПИД-закон реализуется с некоторой динамической погрешностью, которая обусловлена неидеальностью дифференцирующего звена (БДС). Пример принципиальной схемы системы регулирования уровня (ПИ-алгоритм) приведен на рис. 2.20. В качестве датчика регулируемого параметра использован измеритель уровня УГЦ-1, преобразующий значение уровня жидкости в унифицированный токовый сигнал 4÷20 мА. Для питания датчика положения ИМ использован источник БСПТ/2К.

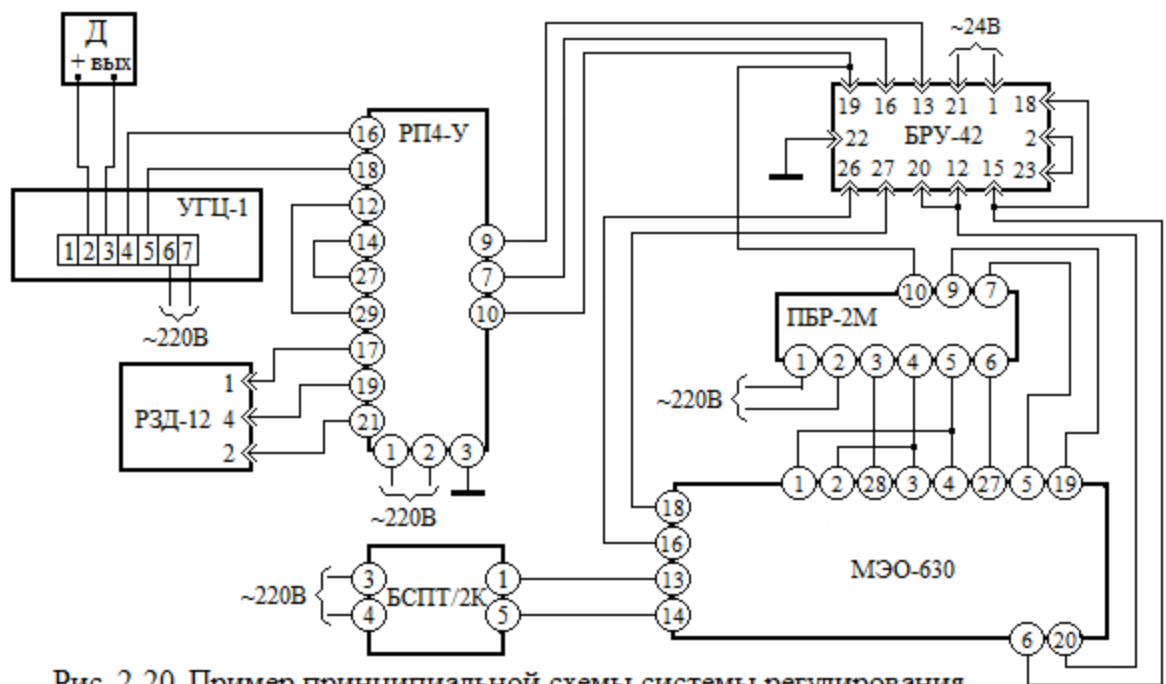


Рис. 2.20. Пример принципиальной схемы системы регулирования на базе регулятора РП-4

### 3. Технические средства автоматизированных систем управления технологическими процессами

#### 3.1. Функциональная структура АСУТП

Обоснованная формулировка требований к комплексу технических средств автоматизированной системы управления технологическим процессом возможна только с учетом информационной и функциональной структуры АСУТП.

Информационные потоки, формируемые в ходе управления технологическим процессом можно представить следующей схемой (рис. 3.1):

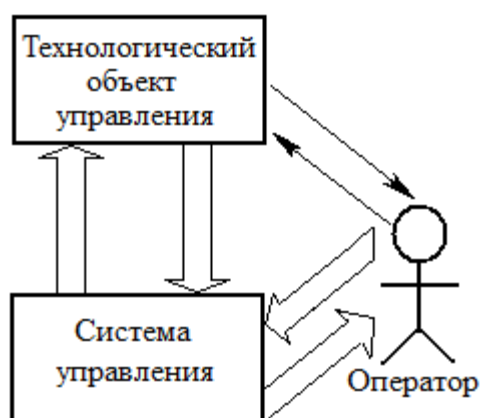


Рис. 3.1 Информационные потоки в АСУТП

Обмен информацией между технологическим объектом управления (ТОУ) и системой управления можно представить в виде двух потоков: от объекта в систему управления поступает информация о текущем состоянии ТОУ, от системы управления в ТОУ передаются регулирующие и управляющие воздействия, направленные на приведение (поддержание) ТОУ в заданное состояние.

Обмен информацией между системой управления и оперативным персоналом также складывается из двух потоков: система управления предоставляет оператору оперативную и отчетную информацию о ходе технологического процесса, принимает и исполняет управляющие директивы оператора.

В режиме нормальной эксплуатации ТОУ прямой обмен информацией между объектом управления и оператором, как правило, не предусмотрен, но в некоторых случаях (не являющихся предметом рассмотрения данного курса) возможно прямое получение информации от ТОУ и непосредственное воздействие на технологический объект с использованием средств дистанционного или ручного управления.

В рамках данной информационной структуры все функции АСУТП можно разделить на информационные и управляющие (рис. 3.2).

Датчики системы управления измеряют технологические переменные объекта и преобразуют измеренные значения в унифицированные сигналы (аналоговые, дискретные или цифровые), которые по каналам связи передаются в систему управления.

Система управления осуществляет сбор данных о состоянии ТОУ и проводит их первичную обработку. Процедура первичной обработки, как правило, включает в себя масштабирование и нормализацию получаемых данных, сглаживание и фильтрацию данных от возможных помех, контроль достоверности и восстановление значений технологических переменных из принятых унифицированных сигналов.

Система управления осуществляет сбор данных о состоянии ТОУ и проводит их первичную обработку. Процедура первичной обработки, как правило, включает в себя масштабирование и нормализацию получаемых данных, сглаживание и фильтрацию данных от возможных помех, контроль достоверности и восстановление значений технологических переменных из принятых унифицированных сигналов.



Рис. 3.2. Функциональная структура АСУТП

Эффективное управление современными сложными и высокоинтенсивными технологическими процессами требует использования возможно более полной информации о состоянии ТОО. Вместе с тем, оперативное получение информации о некоторых параметрах объекта (в особенности, о составах технологических сред) не всегда возможно по чисто техническим или экономическим причинам. В этих случаях система управления должна вычислять неизмеряемые величины с использованием ранее разработанных математических моделей процесса или его стадий.

Обобщенные показатели технологического процесса (параметры качества сырья и продуктов, соотношение произведенных затрат и полученной прибыли, статистика технологических и производственных ситуаций) характеризуют его техническую и экономическую эффективность и могут быть использованы для оптимизации технологического процесса системами управления высших уровней.

Многие объекты химической технологии являются потенциально опасными, поэтому одной из важных информационных функций является прогнозирование состояния ТОО с целью предупреждения аварийных ситуаций. Данная функция предполагает построение временных рядов технологических переменных и выявление в поведении ТОО тенденций, предшествующих возникновению аварий.

Информация, полученная и обработанная системой управления, предоставляется оперативному персоналу для анализа и принятия решений о необходимости вмешательства в процесс управления. Объем, форма и периодичность представления информации определяются в каждом случае отдельно, исходя из специфики технологического процесса и возможностей системы управления.

Функция автоматического регулирования технологических переменных характерна для систем управления непрерывными технологическими процессами и предполагает использование системы управления в качестве многоканального автоматического регулятора, стабилизирующего (или изменяющего) технологические переменные в соответствии с требованиями технологического регламента.

Функция логического управления технологическим процессом характерна для систем управления периодическими технологическими процессами и предполагает управление продвижением материальных и энергетических потоков по технологической цепи в соответствии с временной диаграммой процесса и выполнением условий технологического регламента. Некоторые элементы данной функции используются при реализации противоаварийной защиты.

Оптимизация статики и динамики технологического процесса предполагает расчет и реализацию оптимальных значений уставок и настроечных параметров в каждом контуре регулирования. Особенно часто данные функции используются в системах управления многоассортиментными многопродуктовыми технологическими процессами, а также для организации адаптивных систем управления ТОУ с выраженной нестационарностью.

Важной управляющей функцией является противоаварийная защита ТОУ. В ответственных случаях для выполнения этой функции создается отдельная подсистема управления со своими датчиками, управляющими и исполнительными устройствами. По характеру действий данная функция сходна с функцией логического управления технологическим процессом, но отличается от последней более жесткой направленностью. В подсистемах противоаварийной защиты предусмотрен некоторый перечень предаварийных и аварийных ситуаций, каждой из которых соответствует четкая последовательность действий, направленных на устранение причин возникновения аварии.

Функция приема и исполнения управляющих директив оператора актуальна при решении задач управления, трудно поддающихся формализации. Для выполнения данной функции во многих случаях в систему включают специализированные технические средства, как, например, функциональная клавиатура, каждая клавиша которой формирует определенную команду

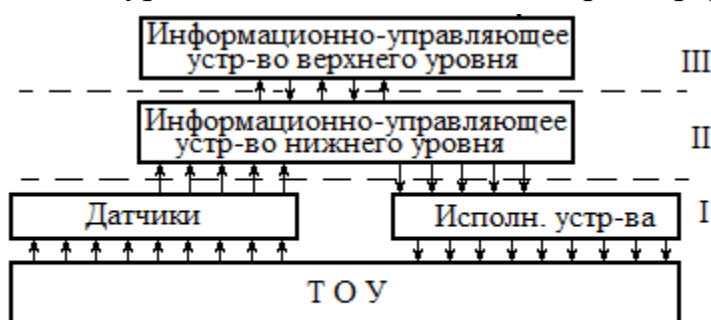


Рис. 3.3. Структура КТС АСУТП

представления технологической информации или управления технологическим процессом.

В достаточно длительном ходе использования информационной и функциональной структур системы управления, приведенных на рис. 3.1 и рис. 3.2, сложилась трехуровневая

структура комплекса технических средств АСУТП (рис. 3.3).

Первый уровень данной структуры представлен средствами получения информации о состоянии ТООУ (датчиками) и средствами использования информации в целях управления (исполнительными устройствами). На втором уровне находится управляющее устройство (или устройства), выполняющее информационные и управляющие функции, которые не требуют использования сколько-нибудь значительных вычислительных ресурсов. К таким функциям можно отнести сбор и первичную обработку данных, автоматическое регулирование и логическое управление технологическим процессом, а также организацию противоаварийной защиты. Третий уровень занимает управляющее устройство, обладающее информационно-вычислительными ресурсами, достаточными для выполнения сложных вычислений и организации диалога с оперативным персоналом. В АСУТП, функционирующих на предприятиях химической технологии, в качестве управляющих устройств нижнего уровня используются микропроцессорные программируемые контроллеры (МПК), а в качестве управляющих устройств верхнего уровня – промышленные ЭВМ (ПЭВМ).

### 3.2. Архитектура комплекса технических средств АСУТП

Понятие архитектуры включает в себя состав, взаимное расположение и способ взаимодействия элементов системы. По отношению к системам управления понятие архитектуры может также характеризовать способ распределения задач и полномочий между элементами. Традиционно известны два типа архитектуры – централизованная и децентрализованная. Появившиеся в последнее время новые разновидности, такие как «клиент – сервер», «Сitect», «масштабируемая», являются некоторыми модификациями децентрализованной архитектуры. Пример комплекса технических средств (КТС), построенного по централизованному принципу, приведен на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Комплекс технических средств централизованной АСУТП

системы управления, трудность информационного и функционального расширения при модернизации ТООУ и развитии производства. Этим недостаткам лишена децентрализованная архитектура, которая предполагает наличие на каждом уровне системы управления нескольких управляющих устройств. Децентрализация системы управления обеспечивает снижение стоимости системы, повышение ее гибкости и адаптивности к решению различных задач управления, улучшение надежности, снижение затрат на монтаж, эксплуатацию и обучение персонала. Для построения децентрализованных систем используются принципы функциональной и топологической децентрализации.

Целью функциональной децентрализации системы управления является снижение ее сложности путем разбиения укрупненных функций системы на более мелкие составляющие. Декомпозиция функций системы осуществляется таким образом, чтобы обеспечить необходимую надежность и экономичность ее функционирования. Функциональная децентрализация проводится по следующим направлениям:

- технологической цепи (детализированные функции относятся к мелким производственным участкам или отдельным агрегатам);
- режимам работы оборудования (детализированные функции относятся к более или менее самостоятельным режимам ТООУ, таким как режимы пуска, останова, нормальной эксплуатации, аварийный режим и др.);
- продолжительности выполнения функций контроля и управления (непрерывное, периодическое, разовое выполнение функций).

Топологическая децентрализация подразумевает оптимизацию взаимного пространственного расположения составных частей системы с целью минимизации суммарной длины линий связи. Необходимо отметить, что результаты процедур функциональной и топологической децентрализации могут быть противоречивыми. Для устранения возможных противоречий применяют сочетание

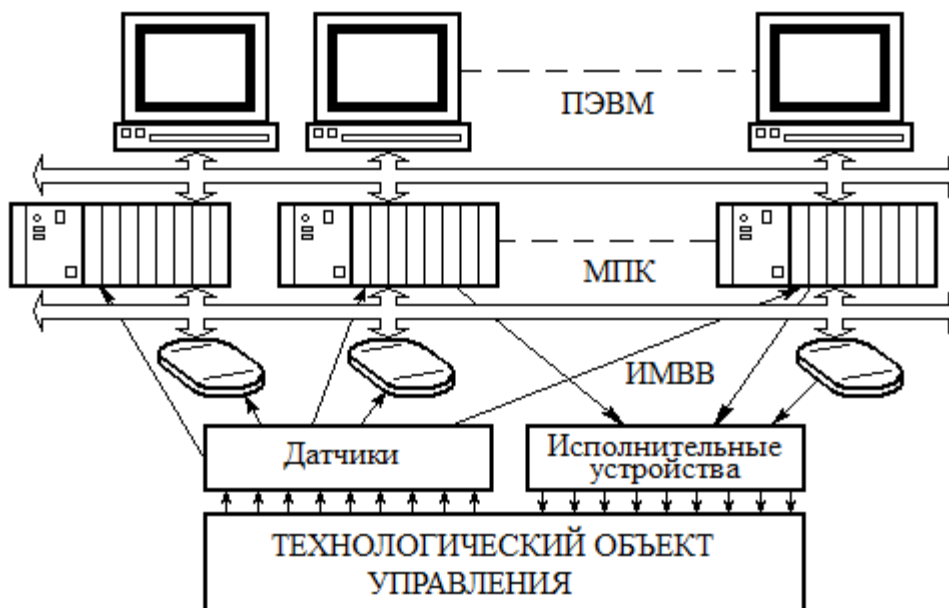


Рис. 3.5. Комплекс технических средств децентрализованной АСУТП

вышеупомянутых принципов – число управляющих устройств определяют по принципу функциональной децентрализации, а их взаимное расположение – по принципу топологической децентрализации.

На рис. 3.5 приведен пример

КТС децентрализованной АСУТП. Для расширения функциональных воз-

возможностей микропроцессорных контроллеров на нижнем уровне использованы дополнительные технические средства – интеллектуальные модули ввода/вывода ИМВВ.

### **3.3. Классификация и структура микропроцессорных программируемых контроллеров**

Основным управляющим устройством в подавляющем большинстве АСУТП является микропроцессорный программируемый контроллер (МПК). МПК – это специализированная управляющая ЭВМ, работающая в реальном масштабе времени по некоторым фиксированным программам. Отличительной особенностью МПК является их жесткая ориентация на решение задач управления определенного типа, связанная с преимущественным размещением управляющих программ в постоянной памяти контроллера.

Принято классифицировать МПК по трем признакам – по функциональному назначению, конструктивному исполнению и мощности.

По функциональному назначению различают регулирующие, логические и специализированные МПК. Регулирующие МПК ориентированы на решение задач автоматического регулирования технологических параметров в непрерывных технологических процессах. Логические МПК ориентированы на решение задач логического управления в периодических технологических процессах, а также на решение задач противоаварийной защиты. Специализированные МПК ориентированы на решение задач управления конкретными объектами, такими как сложные измерительные приборы и комплексы, средства связи, предметы бытовой техники и др. Необходимо отметить, в настоящее время нет четкой грани между логическими и регулируемыми МПК. Контроллеры регулирующего типа способны решать некоторые задачи логического управления, в то время как логические контроллеры могут использоваться для организации систем регулирования. Широко используемые в АСУТП интеллектуальные модули ввода-вывода можно отнести к специализированным МПК.

По конструктивному исполнению различают моноблочные и модульные МПК. Моноблочный контроллер представляет собой микропроцессорное устройство, в едином конструктиве которого располагаются: источник питания, центральный процессор, память программ, память данных, встроенные порты для выхода в сеть, фиксированное число каналов аналогового или дискретного ввода-вывода, встроенный ПИД-регулятор, слот расширения для подключения дополнительных модулей, ЖК-дисплей, индикаторы состояния контроллера. Как правило, моноблочные контроллеры устанавливаются на DIN-рейку. Модульные контроллеры состоят из функциональных модулей, устанавливаемых в приборном каркасе (корзина, шасси, крейт) или монтируемых на DIN-рейку. К этим модулям относятся: микропроцессорный модуль, модуль питания, коммуникационный модуль, модули ввода-вывода, а также специальные модули.

Понятие «мощность МПК» (во многих источниках – «формат МПК») включает в себя число каналов ввода-вывода, характер выполняемых информационно-управляющих функций и быстродействие. Характеристики МПК различной мощности приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Мощность МПК различных форматов

Формат МПК	Число каналов ввода-вывода	Выполняемые функции	Время выполнения 1К бинарных команд, мс
Микро-МПК	10÷100	Логические, временные, счетные, арифметические в формате с фиксированной и плавающей запятой, ПИД-регулирование	≤0,8
Мини-МПК	100÷500	Логические, временные, счетные, полная цифровая обработка, ПИД-регулирование, регулирование по законам нечеткой логики, сетевые возможности	≤0,3
Мощные МПК	100÷128К	Логические, временные, счетные, полная цифровая обработка, ПИД-регулирование, регулирование по законам нечеткой логики, работа с таблицами, средства человеко-машинного интерфейса, сетевые возможности	≤0,1

Независимо от классификационной принадлежности, МПК, используемые в АСУТП, имеют сходную структуру (рис. 3.6). ЦП через внутренний интерфейс взаимодействует с другими составляющими МПК, основными из которых являются системы постоянной и оперативной памяти (ПЗУ и ОЗУ) и интерфейс ввода-вывода ИВВ. Одной из особенностей структуры МПК является то, что память программ и память данных разделены не только логически, но и физически. Все программное обеспечение МПК хранится в матричном или репрограммируемом ПЗУ. ОЗУ МПК используется только для хранения данных. Для повышения надежности ЦП включает в себя резервные обрабатывающие блоки и сторожевые таймеры, контролирующие время выполнения цикла управляющей программы и отдельных ее частей.

Через интерфейс ввода-вывода ЦП взаимодействует с устройством связи с объектом управления (УСО), включающим, в общем случае, четыре подсистемы. Подсистемы аналогового и дискретного ввода организуют ввод данных от аналоговых и дискретных датчиков ТОУ. Подсистемы аналогового и дискретного вывода организуют вывод управляющих и регулирующих воздействий на исполнительные устройства объекта.



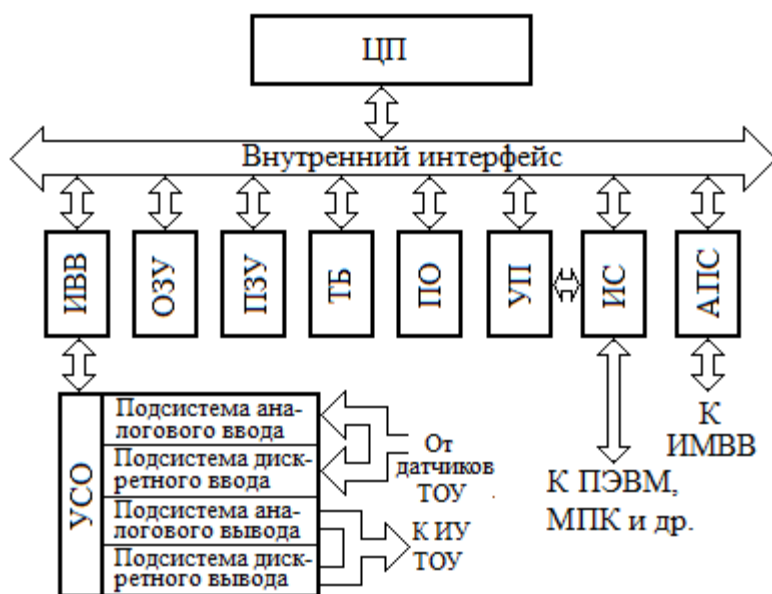


Рис. 3.6. Структура МПК

- ЦП – центральный процессор;
- ОЗУ – оперативное запоминающее устройство;
- ПЗУ – постоянное запоминающее устройство;
- ИБВ – интерфейс ввода-вывода;
- УСО – устройство связи с объектом управления;
- ТБ – тестовый блок;
- ПО – панель оператора;
- АПС – адаптер полевой сети;
- ИС – интерфейс связи;
- УП – устройство программирования

это диалоговое устройство с дисплеем, предназначенное для визуального отображения информации о состоянии ТОУ и оперативного управления им. Также на панели оператора обычно располагаются органы управления и индикации МПК. Адаптер полевой сети предназначен для организации обмена информацией между МПК и интеллектуальными модулями ввода-вывода, использование которых существенно расширяет функциональные возможности МПК. Так, полевая сеть, организованная по стандарту RS-485 позволяет подключить к МПК до 255 модулей ввода-вывода. Интерфейс связи позволяет подключить МПК к промышленной сети или сети общего назначения и организовать обмен информацией между несколькими МПК, между МПК и ПЭВМ, а также осуществлять корректировку и модификации управляющей программы с использованием встроенного в МПК устройства программирования.

В процессе работы МПК циклически исполняет управляющую программу и обменивается данными (через УСО) с объектом управления. Рабочий цикл МПК включает 4 фазы:

- 1) Опрос входов;
- 2) Выполнение управляющей программы с расчетом запрограммированных функций, регулирующих и управляющих воздействий;
- 3) Установку значений выходов;

Перечисленные элементы являются необходимыми и достаточными для функционирования МПК в качестве управляющего устройства. Остальные составляющие расширяют функциональные возможности МПК и обеспечивают удобство его эксплуатации.

Тестовый блок осуществляет периодическую проверку аппаратной части и программного обеспечения МПК, сообщает результаты проверки оператору и при необходимости выполняет штатные действия по замене отказавших узлов и программных модулей резервными.

Панель оператора –

4) Некоторые вспомогательные операции (диагностику, подготовку данных для отладчика, визуализации и т. д.).

### 3.4. Универсальные составляющие подсистем УСО МПК

Устройство связи с объектом управления обеспечивает информационную совместимость датчиков и исполнительных устройств системы управления со входами и выходами МПК. В АСУТП информация о состоянии объекта управления представлена совокупностью унифицированных электрических сигналов в большинстве своем аналоговых или дискретных, реже – цифровых. Управляющие и регулирующие воздействия, информационно совместимые с исполнительными устройствами систем управления, также в большинстве своем должны быть представлены в аналоговой или дискретной (импульсной) форме. Таким образом, основной функцией подсистем УСО является прямое и обратное преобразование унифицированных сигналов из аналоговой или дискретной формы в цифровую. Эти преобразования выполняются подсистемами УСО с использованием универсальных составляющих, построенных по достаточно устоявшимся принципам – аналого-цифровых, цифро-аналоговых, дискретно-цифровых и цифродискретных преобразователей.

#### 3.4.1. Цифроаналоговый преобразователь

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) предназначены для преобразования многоразрядных кодовых комбинаций (чаще всего – позиционных двоичных кодов) в аналоговый сигнал тока или напряжения. Амплитуда аналогового сигнала должна быть пропорциональна числу, эквивалентному входной кодовой комбинации. Если принять, что число  $N_x$ , эквивалентное входному коду, может изменяться в пределах от 0 до  $N_{\max}$ , а выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  – в пределах от 0 до  $U_{\max}$ , то статическая характеристика ЦАП будет иметь вид:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\max}}{N_{\max}} N_x. \quad (3.1)$$

Представим входной код в виде суммы всех разрядов с соответствующими двоичными весами:

$$N_x = a_n 2^{n-1} + a_{n-1} 2^{n-2} + \dots + a_2 2 + a_1,$$

где  $n$  – разрядность входного кода, а коэффициенты  $a$  соответствуют значениям разрядов входного кода. При большом числе разрядов  $n$  можно принять, что  $N_{\max} = 2^n - 1 \approx 2^n$ . Тогда статическая характеристика ЦАП примет вид:

$$U_{\text{вых}} = U_{\max} (a_n 2^{-1} + a_{n-1} 2^{-2} + \dots + a_2 2^{-(n-1)} + a_1 2^{-n}). \quad (3.2)$$

Отсюда следует, что выходной сигнал ЦАП содержит  $n$  слагаемых с двоичными весами. Наличие или отсутствие того или иного слагаемого в суммарном сигнале определяется значением соответствующего разряда входного кода. Статическая характеристика вида (3.2) реализуется с применением рези-

сторных многополюсников с двоично-весовым соотношением токов в ветвях.

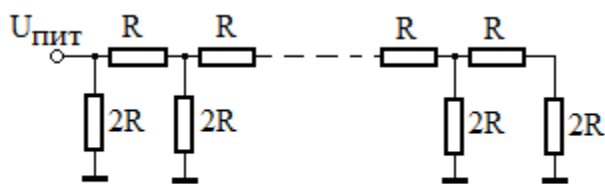


Рис. 3.7. Многополюсник типа R - 2R

Наиболее часто используются многополюсники типа R-2R (рис. 3.7).

Отличительной особенностью данного многополюсника является то, что напряжения в узлах и, следовательно, токи в ветвях последовательно отличаются друг от друга в 2 раза.

Многополюсник работоспособен только в том случае, если все его ветви замкнуты на нулевой провод. Упрощенная схема ЦАП с многополюсником R-2R приведена на рис. 3.8. Схема преобразователя включает в себя входной регистр (триггеры  $D_1 \div D_n$ ), блок разрядных ключей  $K_1 \div K_n$ , резисторный многополюсник R-2R и преобразователь "ток – напряжение" на операционном усилителе А1. При поступлении сигнала записи на входы С триггеров  $D_1 \div D_n$  разряды входного кода  $a_1 \div a_n$  фиксируются во входном регистре. Каждый триггер входного регистра управляет положением соответствующего разрядного ключа. Если  $i$ -й триггер находится в единичном состоянии, то ключ  $K_i$  коммутирует соответствующую ветвь резисторного многополюсника со входом токового преобразователя А1. В противном случае ветвь многополюсника замыкается на нулевой провод. В итоге операционный усилитель А1 суммирует токи всех ветвей резисторного многополюсника, для которых разряды входного кода равны логической "1". Сумма разрядных токов преобразуется в выходное напряжение с коэффициентом  $R_{oc}$ . Точность преобразования определяется разрядностью  $n$  и выражается через единицу младшего значащего разряда (1мзр):

$$1_{мзр} = R_{oc} \frac{U_{num}}{2^{n+1} R} \quad (3.3)$$

Время преобразования определяется только быстродействием входного регистра и разрядных ключей, так как при изменении входного кода переходные процессы в аналоговых цепях практически отсутствуют (входное напряжение токового преобразователя А1 приближается к нулю, и токи в ветвях многополюсника R-2R не зависят от положения разрядных ключей). При необходимости иметь на выходе унифицированный токовый сигнал на выходе ЦАП устанавливают преобразователь «на-

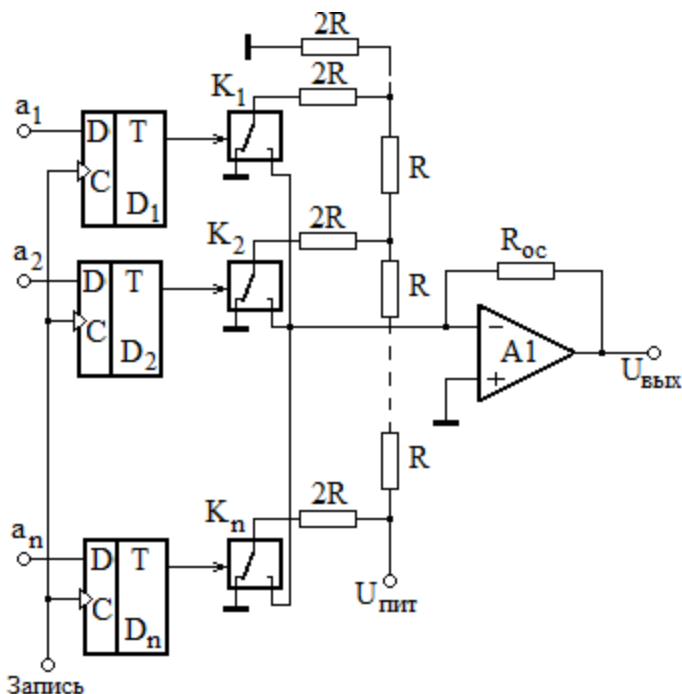


Рис. 3.8. Цифро-аналоговый преобразователь с многополюсником R-2R

пряжение – ток» с кондуктивным разделением.

### 3.4.2. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) предназначены для преобразования входных аналоговых сигналов в цифровой (чаще всего позиционный двоичный) код. В системах управления наиболее часто используются АЦП, построенные по двум основным принципам – последовательного счета и поразрядного кодирования (уравновешивания). Преобразователи последовательного счета преобразуют входную величину во временной интервал, заполняемый последовательностью тактовых сигналов с фиксированной частотой. Преобразователи поразрядного кодирования осуществляют компенсацию входной величины эталонными двоично-весовыми сигналами путем последовательных приближений. АЦП последовательного счета, в свою очередь, подразделяются на классические и интегрирующие.

#### 3.4.2.1. Классический АЦП последовательного счета

Упрощенная схема классического преобразователя последовательного счета приведена на рис. 3.9. Преобразователь включает в себя генератор тактовых сигналов **G**, двоичный триггер **D1**, логический элемент "И" **D2**, двоичный счетчик **D3**, цифроаналоговый преобразователь и компаратор напряжения **A1**.

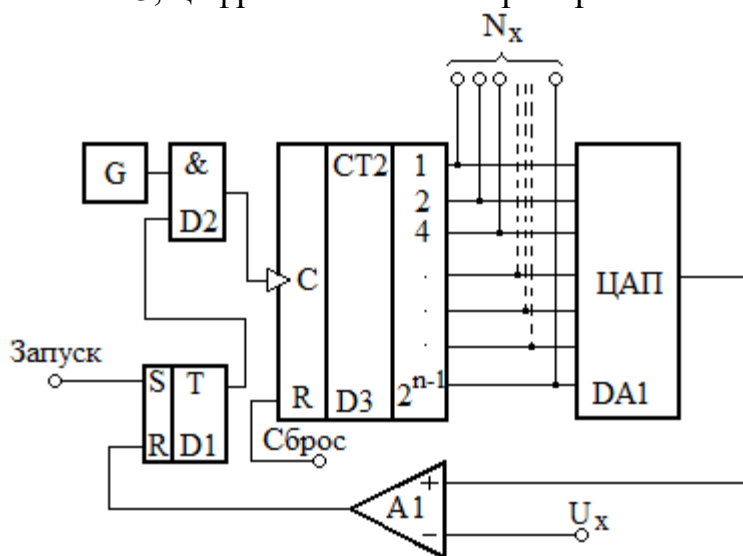


Рис. 3.9. Упрощенная схема АЦП последовательного счета

Временная диаграмма работы АЦП представлена на рис. 3.10. В исходном состоянии на выходах триггера **D1** и компаратора **A1** установлен логический нуль. Прохождение тактовых сигналов через элемент **D2** на счетчик **D3** запрещено. Кодовая комбинация на выходах счетчика **D3** эквивалентна нулю, выходное напряжение ЦАП равно нулю. Сигнал запуска устанавливает триггер **D1** в единичное состояние, и

прохождение тактовых сигналов через элемент **D2** на счетчик **D3** разрешается. С приходом каждого тактового импульса счетчик **D3** наращивает выходную кодовую комбинацию на единицу. ЦАП преобразует этот код в аналоговый сигнал. Таким образом, выходное напряжение ЦАП ступенчато нарастает во времени. Амплитуда ступеньки соответствует  $1mзр$ . Счет тактовых сигналов продолжается до тех пор, пока выходное напряжение ЦАП не превысит входное преобразуемое напряжение  $U_x$ . В этот момент на выходе компаратора **A1** устанавливается логическая единица, триггер **D1** сбрасывается и счет тактовых сигналов прекращается. На выходах счетчика **D3** фиксируется кодовая комбинация.

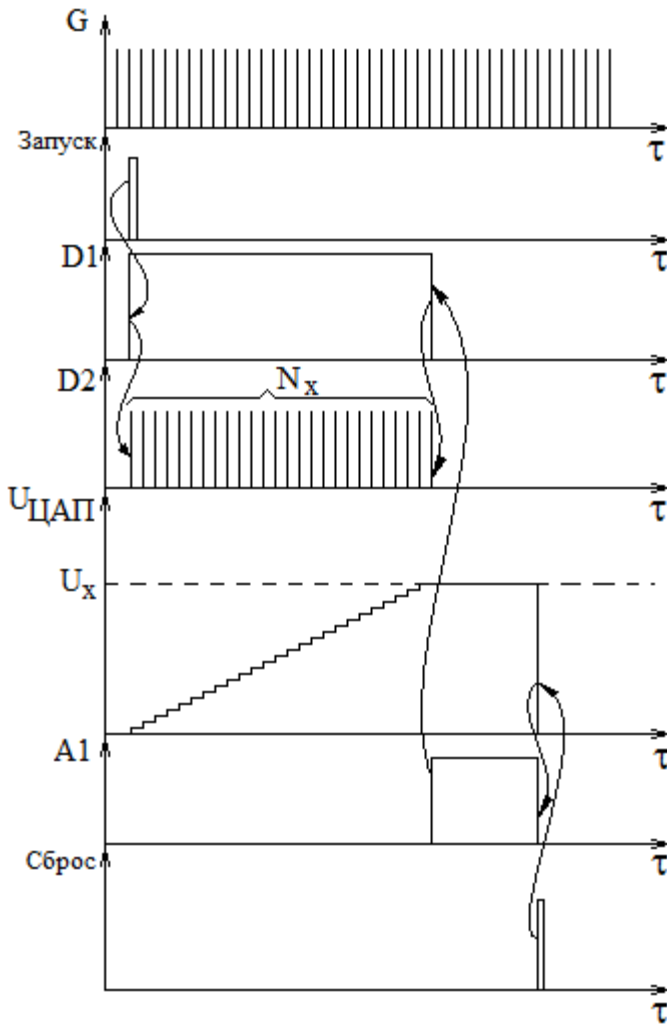


Рис. 3.10. Временная диаграмма АЦП последовательного счета

нация  $N_x$ , эквивалентная входному преобразуемому напряжению  $U_x$ . Статическая характеристика преобразователя будет иметь вид:

$$N_x = 2^n \frac{U_x}{1\text{мзр}}. \quad (3.4)$$

Точность преобразования определяется разрядностью  $n$  и ограничена 1мзр. Время преобразования определяется из соотношения:

$$t_{пр} = \frac{N_x}{f_{такт}}, \quad (3.5)$$

где  $f_{такт}$  – частота генератора тактовых сигналов.

### 3.4.2.2. АЦП последовательного счета с компенсационным интегрированием

Интегрирование входного аналогового сигнала позволяет значительно повысить точность и помехозащищенность АЦП, поскольку спектральные характеристики полезных сигналов и шумов существенно различны. Упрощенная схема АЦП с компенсационным интегрированием приведена на рис. 3.11.

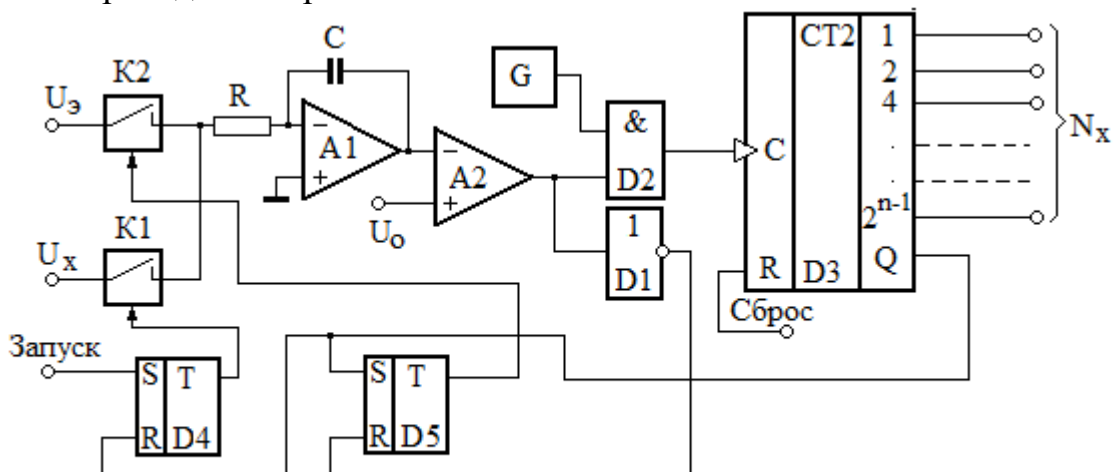


Рис. 3.11. Упрощенная схема АЦП с компенсационным интегрированием

Основными элементами преобразователя являются: аналоговый интегратор на операционном усилителе A1, компаратор напряжений A2, аналоговые ключи K1 и K2, управляемые триггерами D4 и D5, а также генератор тактовых сигналов G и многоразрядный счетчик D3 со схемами управления D1 и D2.

В исходном состоянии на выходах триггеров D4, D5 и компаратора A2 установлен логический нуль, ключи K1 и K2 разомкнуты, выходное напряжение интегратора A1 равно нулю, прохождение тактовых сигналов через элемент D2 на счетчик D3 запрещено, выходная кодовая комбинация счетчика эквивалентна нулю. Временная диаграмма работы АЦП приведена на рис. 3.12.

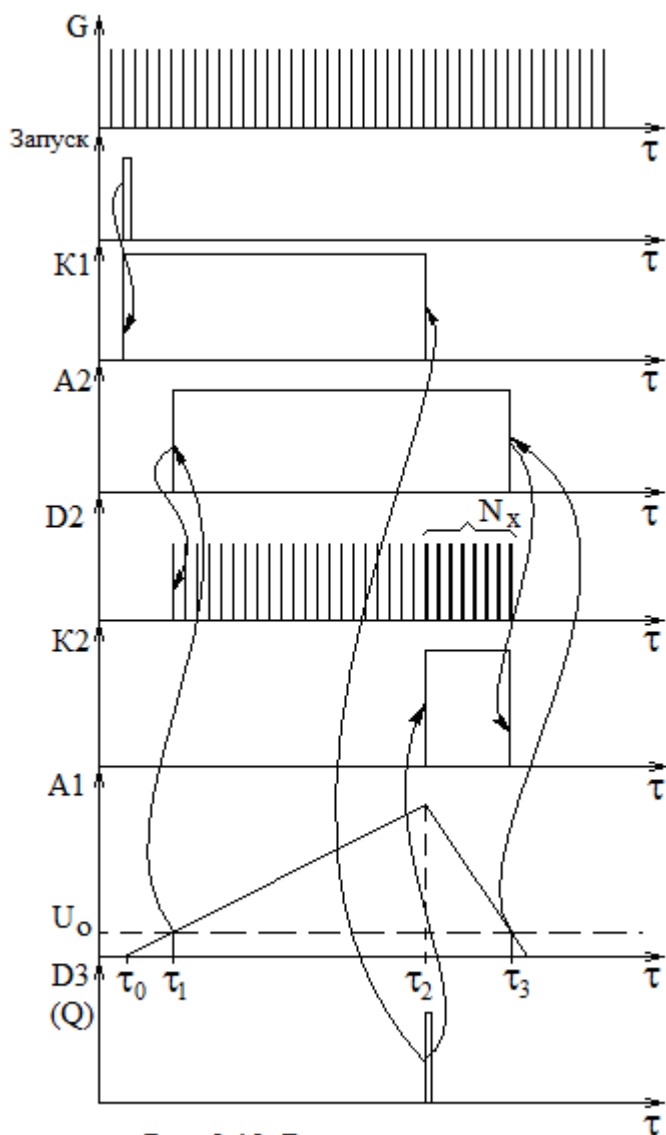


Рис. 3.12. Временная диаграмма интегрирующего АЦП

компаратора A2 устанавливается логическая единица. Счетчик D3 начинает счет тактовых сигналов, поступающих с генератора G через элемент D2. Интегрирование напряжения  $U_x$  производится в течение фиксированного промежутка времени  $t_1 = \tau_2 - \tau_1$ , длительность которого определяется разрядностью счетчика D3 и частотой тактовых сигналов. К концу интервала времени  $t_1$  выходное напряжение интегратора достигнет величины:

$$U_{A1}(\tau_2) = U_0 + \frac{1}{T_u} \int_{\tau_1}^{\tau_2} U_x d\tau.$$

В момент времени  $\tau_2$  разрядность счетчика переполняется, и выдается сигнал переполнения Q, который сбрасывает триггер D4 и устанавливает в единичное состояние триггер D5. Ключ K1 размыкается и замыкается ключ K2, который подает на вход интегратора эталонное напряжение  $U_0$ , полярность ко-

выходное напряжение интегратора A1 равно нулю, прохождение тактовых сигналов через элемент D2 на счетчик D3 запрещено, выходная кодовая комбинация счетчика эквивалентна нулю. Временная диаграмма работы АЦП приведена на рис. 3.12.

В момент времени  $\tau_0$  на триггер D4 поступает сигнал запуска. Триггер устанавливается в единичное состояние и замыкает ключ K1. На вход интегратора подается входное преобразуемое напряжение  $U_x$ . Выходное напряжение интегратора будет изменяться во времени в соответствии с соотношением:

$$U_{A1} = \frac{1}{T_u} \int_0^t U_x d\tau,$$

где  $T_u$  – постоянная времени интегратора, равная RC. Это напряжение поступает на один из входов компаратора A2. На другой вход подается опорное напряжение  $U_0$ , определяющее зону нечувствительности АЦП к низкочастотным помехам. В момент времени  $\tau_1$   $U_{A1}$  достигает величины  $U_0$  и на выходе

того противоположна полярности  $U_x$ . Счетчик D3 продолжает счет тактовых сигналов, а выходное напряжение интегратора будет изменяться по закону:

$$U_{A1} = U_{A1}(\tau_2) - \frac{1}{T_u \tau_2} \int_{\tau_2}^{\tau} U_{\text{э}} d\tau.$$

В момент времени  $\tau_3$  достигается равенство  $U_{A1}=U_0$ , компаратор A2 устанавливается в нулевое состояние, размыкает ключ K2 и запрещает дальнейшее прохождение тактовых сигналов на счетчик D3. На выходах счетчика фиксируется код, эквивалентный числу

$$N_x = \frac{\tau_3 - \tau_2}{\tau_T} = \frac{t_2}{\tau_T},$$

где  $\tau_T$  – период следования тактовых сигналов. Если напряжения  $U_x$  и  $U_{\text{э}}$  постоянны во времени, то справедливо равенство:  $U_x t_1 = U_{\text{э}} t_2$ . Учитывая, что  $t_1 = 2^n \tau_T$  получим статическую характеристику АЦП в виде:

$$N_x = 2^n \frac{U_x}{U_{\text{э}}}. \quad (3.6)$$

Точность преобразования, как и в предыдущем случае, определяется  $1\text{мзр}$ , но случайная погрешность существенно ниже за счет эффективной фильтрации входного сигнала при интегрировании. Время преобразования выше по сравнению с классическим АЦП последовательного счета:

$$t_{np} = \frac{2^n + N_x}{f_{\text{такт}}}. \quad (3.7)$$

### 3.4.2.3. АЦП поразрядного кодирования

АЦП поразрядного кодирования обладают гораздо большим быстродействием по сравнению с АЦП последовательного счета. Упрощенная схема преобразователя (8-разрядного) приведена на рис. 3.13. Схема включает в себя регистр последовательных приближений D13, дешифратор  $3 \times 8$  D3, четырехразрядный счетчик D1, генератор тактовых сигналов G, инвертор D2, логические элементы "И" D4 – D12, цифроаналоговый преобразователь DA1 и компаратор напряжения A1.

Преобразователь работает следующим образом. С приходом сигнала запуска счетчик D1 сбрасывается, и во всех разрядах регистра D13, кроме старшего, устанавливается логический нуль. В старшем разряде D13 устанавливается логическая единица. Начиная с этого момента разрешается прохождение тактовых сигналов с генератора G на входы счетчика D1 и регистра D13. Логическая единица в старшем разряде D13 преобразуется цифроаналоговым преобразователем в напряжение, которое сравнивается компаратором A1 с входным преобразуемым напряжением  $U_x$ . Если выходное напряжение ЦАП

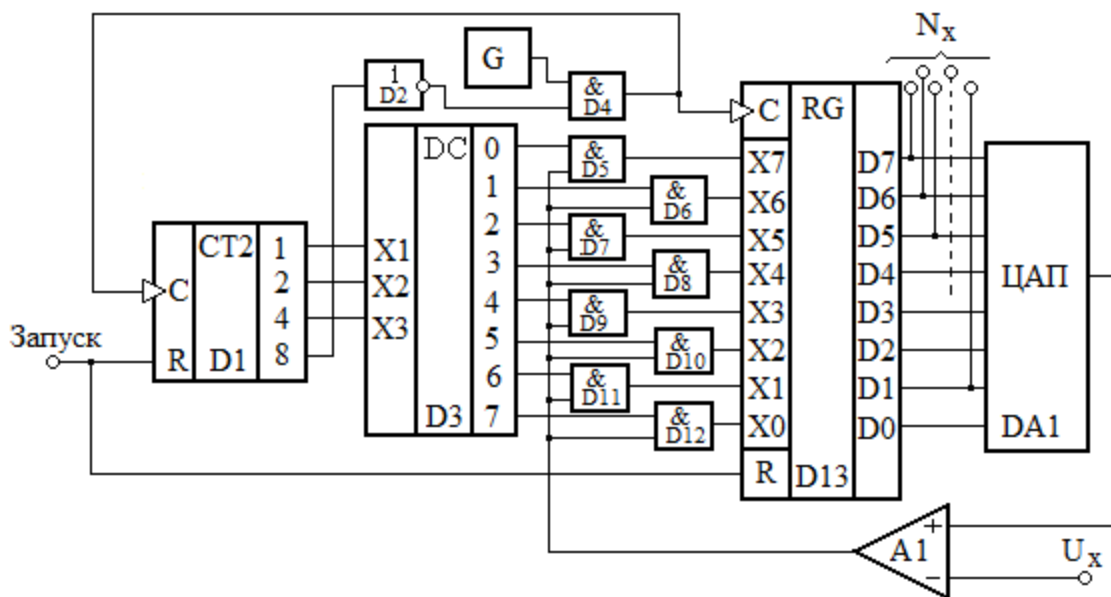


Рис. 3.13. Упрощенная схема АЦП поразрядного кодирования

превышает  $U_x$ , то единица в старшем разряде регистра сбрасывается, если нет – сохраняется. Цикл преобразования повторяется 8 раз, и на выходах регистра D13 фиксируется код, эквивалентный напряжению  $U_x$ . Появление единицы в старшем разряде счетчика D1 запрещает дальнейшее прохождение тактовых сигналов на входы счетчика D1 и регистра D13, и преобразование заканчивается.

Статическая характеристика преобразователя описывается уравнением (3.7), точность преобразования соответствует 1мзр, а время преобразования не зависит от величины преобразуемого сигнала и определяется соотношением :

$$t_{np} = \frac{n}{f_{такт}}, \quad (3.8)$$

где  $n$  – разрядность преобразователя, а  $f_{такт}$  – частота тактовых сигналов.

В некоторых случаях метод аналого-цифрового преобразования сочетает в себе алгоритмы последовательного счета и поразрядного кодирования. Преобразование в старших  $m$  разрядах выполняется по методу поразрядного кодирования, а в младших  $n - m$  разрядах – по методу последовательного счета. Применение комбинированных алгоритмов преобразования позволяет исправлять ошибки в старших разрядах, характерные для преобразователей поразрядного кодирования.

### 3.4.3. Коммутаторы информационных сигналов

Коммутаторы предназначены для создания перестраиваемой системы связей, обеспечивающей прохождение информационных сигналов в заданных направлениях. Важную роль в информационно-управляющих системах играют измерительные коммутаторы, предназначенные для мультиплексирования аналоговых измерительных сигналов. Основными характеристиками измерительных коммутаторов являются:



- динамический диапазон коммутируемых сигналов  $D_d = A_{\max}/A_{\min}$ , равный отношению максимальной и минимальной амплитуд коммутируемых сигналов;
- погрешность коэффициента передачи  $\delta = (A_{\text{ВХ}} - A_{\text{ВЫХ}})/A_{\text{ВХ}}$ , где  $A_{\text{ВХ}}$  и  $A_{\text{ВЫХ}}$  – амплитуды входного и выходного сигналов коммутатора;
- быстродействие, характеризуемое максимально возможным числом переключений в единицу времени или промежутком времени, необходимым для выполнения одного переключения;
- число коммутируемых сигналов  $n$ , число выходов  $h$  и число коммутационных каналов  $k$ ;
- количество коммутационных  $N$  и управляющих  $M$  элементов.

В структуре коммутатора можно выделить две составные части – определенным образом организованную систему коммутационных элементов и схему управления. В качестве коммутационных элементов чаще всего используются магнитоуправляемые контакты или бесконтактные ключи на основе биполярных или МОП-полупроводниковых структур. Организация системы коммутационных элементов может быть одноступенчатой, многоступенчатой или матричной (рис. 3.14).

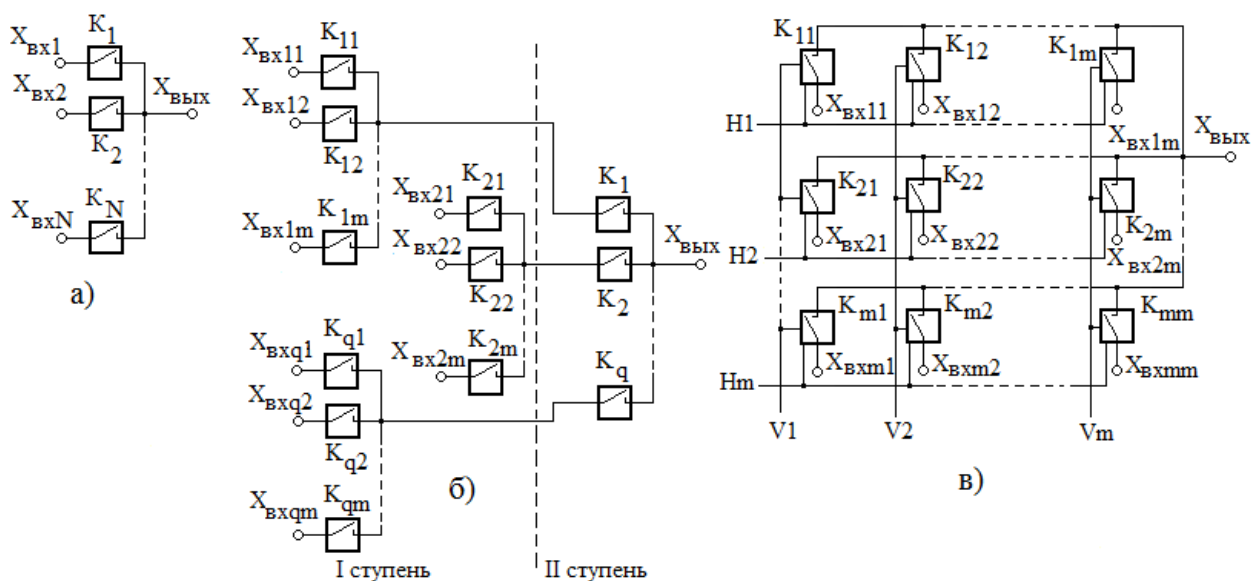


Рис.3. 14. Структура системы коммутационных элементов:  
а – одноступенчатая; б – двухступенчатая; в – матричная

Одноступенчатая структура наиболее проста, но при большом числе коммутируемых сигналов требует использования счетчиков и дешифраторов большой разрядности. Число управляющих элементов в данном случае совпадает с числом коммутационных элементов и коммутируемых сигналов. Двухступенчатая структура предполагает разделение всего множества коммутируемых сигналов на  $q$  групп по  $m$  элементов в каждой. Данная структура позволяет при незначительном увеличении числа коммутационных элементов  $N = q(m+1)$  существенно сократить число управляющих элементов  $M = m+q$  и, тем самым, упростить схему управления. Матричная структура позволяет по-

лучить выигрыш в количестве управляющих элементов без увеличения числа коммутационных элементов  $M = 2\sqrt{N}$ .

Схема управления коммутатора представляет собой совокупность много-разрядного счетчика и дешифратора (рис. 3.15)

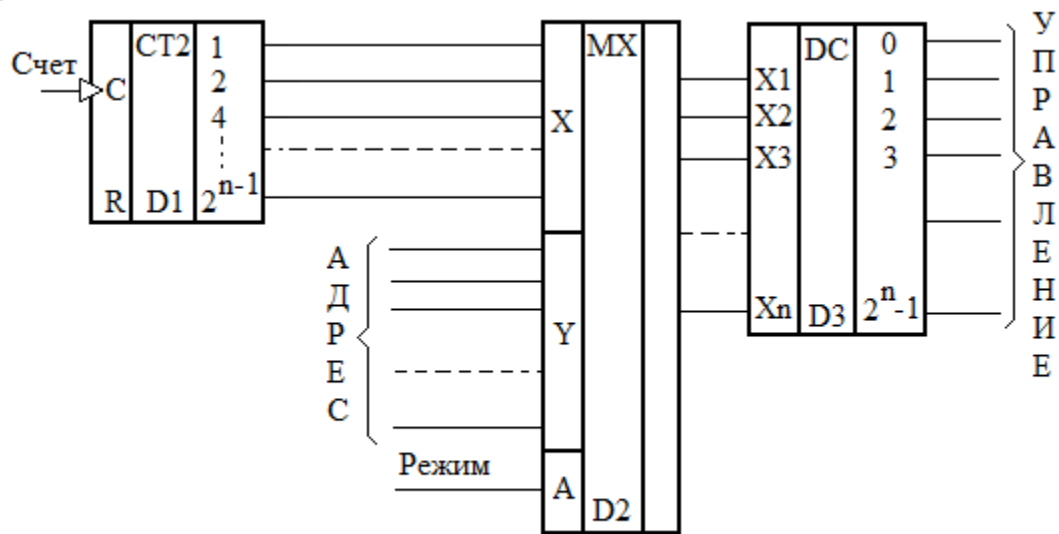


Рис. 3.15. Схема управления одноступенчатым коммутатором

Управление коммутацией производится от дешифратора D3, на входы которого подается двоичный код, эквивалентный номеру коммутируемого канала. Данная схема управления позволяет реализовать два режима работы коммутатора – циклический и адресный. Выбор режима производится подачей сигнала на вход "А" мультиплексора D2. В циклическом режиме кодовая комбинация, определяющая номер коммутируемого канала, поступает на входы дешифратора D3 с выходов счетчика D1. При подаче тактовых сигналов на вход счетчика D1 происходит переключение каналов по возрастанию их порядкового номера. В адресном режиме каналы могут коммутироваться в произвольном порядке, а код номера канала поступает на входы дешифратора D3 с адресных входов мультиплексора D2.

При управлении двухступенчатым коммутатором число элементов схемы управления удваивается, а счетчики 1-й и 2-й ступеней соединяются последовательно. Аналогично организуется и управление матричным коммутатором.

Коммутаторы, построенные из ключевых элементов с малым проходным сопротивлением, могут выполнять функции как мультиплексоров (устройств с несколькими входами и одним выходом), так и демультиплексоров (устройств с одним входом и несколькими выходами).

Цифровые мультиплексоры и демультиплексоры сигналов по принципу действия отличаются от аналоговых. Они не образуют прямых соединений между выходом и входом, а только копируют логический уровень сигнала на выбранном входе. Для построения цифровых коммутаторов, как правило, используются интегральные схемы необходимой функциональности.

### 3.5. Структура и принципы работы подсистем УСО МПК

#### 3.5.1. Подсистема аналогового ввода

Основными функциями подсистем аналогового ввода являются:

- нормализация, усиление и смещение уровней аналоговых сигналов;
- преобразование токовых сигналов в сигналы напряжения;
- коммутация аналоговых и цифровых сигналов;
- аналого-цифровое преобразование.

Технические характеристики подсистем аналогового ввода оценивают по двум параметрам – уровню сигналов (низкоуровневые – с диапазоном изменения сигналов  $0 \div 100$  мВ и высокоуровневые – с диапазоном изменения сигналов  $0 \div 10$  В) и быстродействию (менее  $0,02 \cdot 10^4$  операций/с – низкое; от  $0,02 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^4$  операций/с – среднее и более  $5 \cdot 10^4$  операций/с – высокое).

По принципам построения различают многоканальные и многоточечные подсистемы аналогового ввода. Структура многоканальной подсистемы представлена на рис. 3.16. Подсистема включает в себя N автономных каналов

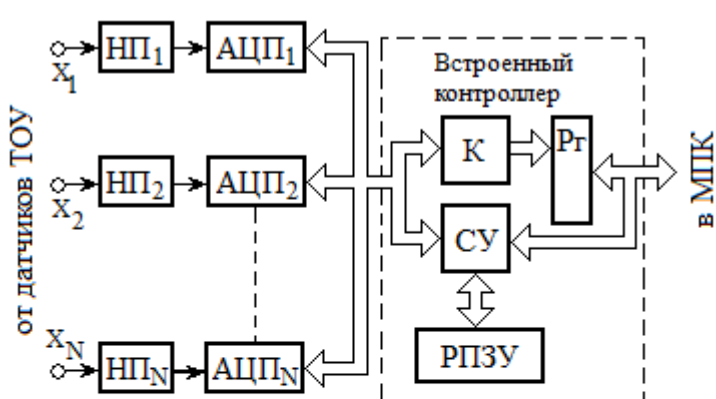


Рис. 3.16. Многоканальная подсистема аналогового ввода

- НП – нормирующий преобразователь;
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
- К – цифровой коммутатор;
- СУ – схема управления;
- РПЗУ – репрограммируемое ПЗУ;
- Рг – выходной регистр

преобразования, в каждом из которых содержится нормирующий преобразователь НП и аналого-цифровой преобразователь АЦП. Нормирующие преобразователи выполняют все необходимые действия над аналоговыми сигналами и обеспечивают совместимость выходов датчиков со входами АЦП. Все действия подсистемы координируются встроенным контроллером, который включает в себя цифровой коммутатор, выходной регистр и схему управления, работающую по программе, записанной в РПЗУ.

Все АЦП функционируют в циклическом режиме, и в их выходных регистрах всегда содержатся результаты преобразований, готовые к вводу в МПК. Один из вариантов алгоритма функционирования подсистемы выглядит следующим образом:

- 1) МПК передает в СУ команду чтения, содержащую адрес (условный номер) канала, из которого необходимо прочесть данные;
- 2) СУ передает адрес канала в коммутатор К;
- 3) Коммутатор подключает выход нужного АЦП ко входу регистра Рг;
- 4) СУ производит запись данных в Рг и сообщает МПК, что данные установлены, а МПК выполняет чтение данных из РГ.

Многоканальная подсистема аналогового ввода обладает лучшими показателями точности и быстродействия, однако при большом числе каналов является дорогостоящей. Более дешевым вариантом подсистемы аналогового ввода является многоточечная подсистема. Структура многоточечной подсистемы аналогового ввода приведена на рис.3.17. Данный вариант подсистемы содержит  $N$  нормирующих преобразователей, но аналого-цифровой преобразователь всего один. Выходы нормирующих преобразователей подключаются ко входу АЦП аналоговым коммутатором  $K$ . Все действия подсистемы координируются встроенным контроллером, который включает в себя выходной регистр и схему управления, работающую по программе, записанной в РПЗУ. Возможный алгоритм работы подсистемы выглядит следующим образом:

- 1) МПК передает в СУ команду чтения, содержащую адрес (условный номер) канала, из которого необходимо прочитать данные;
- 2) СУ передает адрес канала в коммутатор  $K$ ;
- 3) Коммутатор  $K$  подключает выход нужного НП ко входу АЦП;
- 4) После временной выдержки, необходимой для завершения переходных процессов во входных цепях АЦП, СУ запускает АЦП и он выполняет аналого-цифровое преобразование;
- 5) По завершении аналого-цифрового преобразования СУ производит запись данных в Рг и сообщает МПК, что данные установлены, а МПК выполняет чтение данных из РГ.

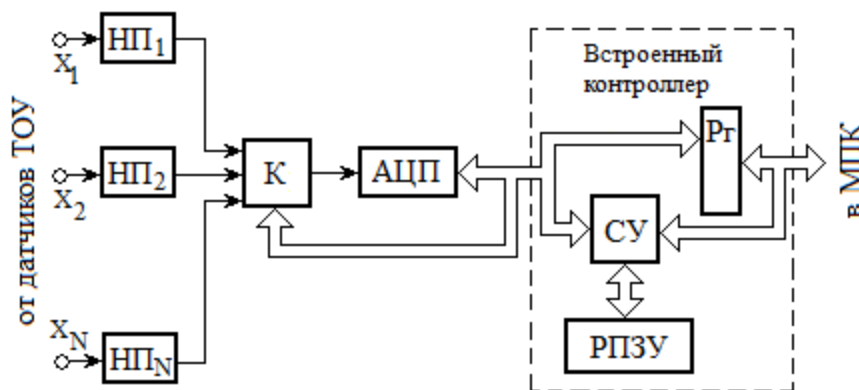


Рис. 3.17. Многоточечная подсистема аналогового ввода

НП - нормирующий преобразователь;  
 АЦП - аналого-цифровой преобразователь;  
 К - аналоговый коммутатор;  
 СУ - схема управления;  
 РПЗУ - репрограммируемое ПЗУ;  
 Рг - выходной регистр

По точности и быстродействию многоточечная подсистема уступает многоканальной. Причиной возможного снижения точности является фиксированный диапазон измерения АЦП, не учитывающий диапазонов изменения технологических переменных. Причиной пониженного быстродействия является наличие временных за-

держек, обусловленных переходными процессами при переключениях каналов и конечным временем выполнения аналого-цифрового преобразования. Вместе с тем, многоточечные подсистемы гораздо дешевле многоканальных, что является существенным преимуществом при создании систем управления технологическими объектами с большим числом регулируемых и контролируемых параметров.

### 3.5.2. Подсистема аналогового вывода

Подсистема аналогового вывода осуществляет преобразование управляющих кодовых комбинаций МК в аналоговую форму, пригодную для

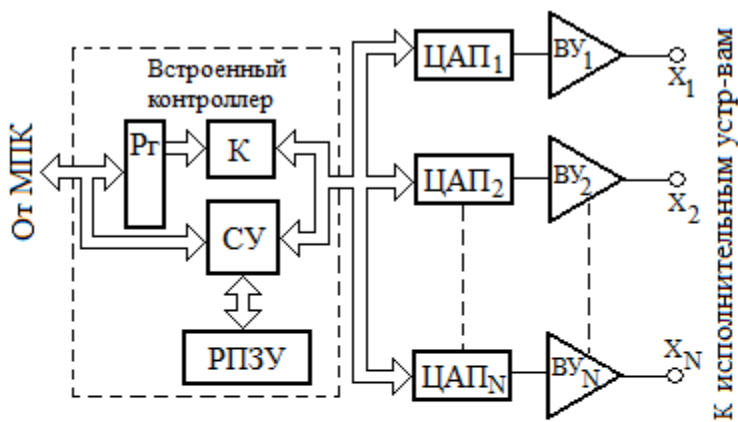


Рис. 3.18. Многоканальная подсистема аналогового вывода

- Рг - входной регистр;
- К - цифровой коммутатор;
- СУ - схема управления;
- РПЗУ - репрограммируемое ПЗУ;
- ЦАП - цифроаналоговый преобразователь;
- ВУ - выходной усилитель

управления исполнительными устройствами ТОО. Известны три типа конфигурации подсистемы аналогового вывода: многоканальная, мультиплицированная и комбинированная. Структура многоканальной подсистемы аналогового вывода приведена на рис. 3.18.

Подсистема включает в себя N каналов вывода, в каждом из которых содержится цифроаналоговый преобразователь и выходной усилитель, преобразующий выходной сигнал ЦАП в унифицированный сигнал, информа-

ционно совместимый со входом исполнительного устройства. Все действия подсистемы координируются встроенным контроллером, который включает в себя цифровой коммутатор, входной регистр и схему управления, работающую по программе, записанной в РПЗУ. Возможный алгоритм работы подсистемы выглядит следующим образом:

- 1) МК передает во входной регистр Рг данные для установки в требуемый канал;
- 2) МК передает в СУ команду записи, содержащую адрес (условный номер) канала, в который необходимо установить данные;
- 3) СУ передает адрес канала в коммутатор К, который подключает выход регистра Рг ко входу соответствующего ЦАП;
- 4) ЦАП выполняет цифро-аналоговое преобразование и с помощью выходного усилителя формирует унифицированный сигнал в соответствующем канале.

Многоканальные подсистемы аналогового вывода обладают хорошими показателями точности и быстродействия, однако, при большом числе каналов становятся дорогостоящими. Более дешевым вариантом подсистемы аналогового вывода является мультиплицированная подсистема, структура которой приведена на рис. 3.19.

В данной подсистеме запоминание информации ведется на двух уровнях: на цифровом во входных регистрах Рг и на аналоговом в схемах выборки-хранения СВХ. Во входных регистрах  $R_{г1} \div R_{гN}$  хранятся кодовые комбинации, эквивалентные аналоговым сигналам на выходах соответствующих кана-

лов подсистемы. Информация в СВХ хранится в виде заряда на емкости и, вследствие конечного тока утечки, должна периодически восстанавливаться.

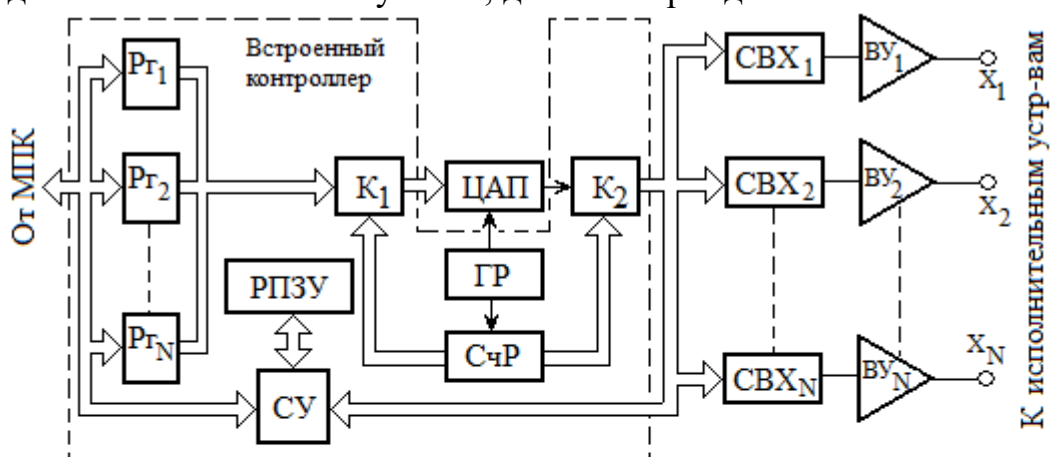


Рис. 3.19. Мультиплицированная подсистема аналогового вывода

- Rr – входной регистр;
- K<sub>1</sub> – цифровой коммутатор;
- ЦАП – цифроаналоговый преобразователь;
- K<sub>2</sub> – аналоговый коммутатор;
- ГР – генератор регенерации;
- СчР – счетчик регенерации;
- СВХ – схема выборки-хранения;
- ВУ – выходной усилитель;
- СУ – схема управления;
- РПЗУ – репрограммируемое ПЗУ

Процесс восстановления данных в СВХ протекает следующим образом. Генератор регенерации ГР формирует последовательность импульсов с частотой  $f_{рег} = \frac{N}{t_{xp}}$ , где  $N$  – число каналов подсистемы и  $t_{xp}$  – допустимое время

хранения информации в СВХ без восстановления. Счетчик регенерации СчР устанавливает на коммутаторах K<sub>1</sub> и K<sub>2</sub> адрес очередного канала, в котором необходимо восстановить информацию. Коммутатор K<sub>1</sub> подключает вход ЦАП к выходу требуемого регистра данных Rr, а коммутатор K<sub>2</sub> подключает выход ЦАП к соответствующей СВХ. ЦАП выполняет цифроаналоговое преобразование, и СВХ запоминает аналоговый сигнал. Выходной усилитель ВУ обеспечивает совместимость выхода СВХ со входом исполнительного устройства. Процесс регенерации протекает без участия схемы управления, которая координирует только процесс записи информации во входные регистры в соответствии с программой, хранящейся в РПЗУ.

Возможный алгоритм работы подсистемы выглядит следующим образом:

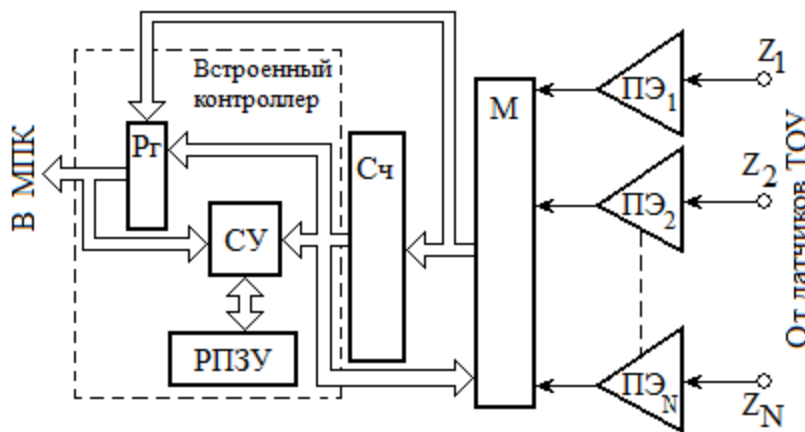
- 1) МПК передает в СУ команду записи, содержащую адрес (условный номер) канала, в который необходимо установить данные и устанавливает на шине данных информацию, предназначенную для записи во входной регистр подсистемы;
- 2) по команде СУ информация записывается в соответствующий входной регистр;

3) далее в цикле регенерации информация преобразуется в аналоговую форму, записывается в соответствующую СВХ и поступает на выход подсистемы.

По точности и быстродействию мультиплицированная подсистема, безусловно, уступает многоканальной, так как хранение информации в аналоговой форме несколько снижает точность подсистемы, а при установке нового значения в одном из каналов возможна задержка длительностью до  $t_{xp}$ , необходимой для восстановления информации во всех каналах. Вместе с тем, при большом числе каналов мультиплицированная подсистема значительно дешевле многоканальной и чаще используется при создании систем управления технологическими объектами с большим числом регулируемых и контролируемых параметров.

### 3.5.3. Подсистема дискретного ввода

Подсистема дискретного ввода предназначена для ввода в память МПК информации, поступающей от дискретных датчиков системы управления.



В качестве таких датчиков могут служить сигнализаторы предельных значений технологических параметров, а также сигнализаторы положения исполнительных устройств.

Рис. 3.20. Подсистема дискретного ввода

- ПЭ - пороговый элемент;
- М - мультиплексор;
- Сч - счетчик;
- СУ - схема управления;
- РПЗУ - репрограммируемое ПЗУ;
- Рг - выходной регистр

Типовая структура подсистемы дискретного ввода приведена на рис. 3.20. Основными функциями подсистемы являются ввод одиночных и счет многократно повторяющихся дискретных сигналов.

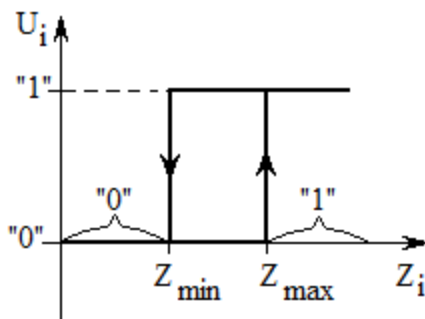


Рис. 3.21. Статическая характеристика порогового элемента

Для однозначной идентификации уровня сигналов и обеспечения необходимой помехозащищенности на входах подсистемы установлены пороговые элементы. Релейная статическая характеристика порогового элемента (рис. 3.21) позволяет защитить подсистему от помех вблизи предельных уровней входного сигнала  $Z_{min}$  и  $Z_{max}$ . Все действия подсистемы координируются встроенным контроллером, который включает в себя выходной регистр и схему управления, работающую по программе, записанной в РПЗУ.

В режиме ввода сигналов мультиплексор направляет выходные сигналы в регистр  $R_r$ , который выполняет «упаковку» отдельных дискретных сигналов в кодовые комбинации, информационно совместимые с системой кодирования МПК. В режиме счета мультиплексор направляет выходные сигналы пороговых элементов в многоканальный счетчик  $Сч$ . Выходные кодовые комбинации счетчика периодически передаются в регистр  $R_r$  и далее в память МПК.

### 3.5.4. Подсистема дискретного вывода

Подсистема дискретного вывода осуществляет преобразование кодовых комбинаций МПК в унифицированные дискретные сигналы, используемые далее в качестве регулирующих или управляющих воздействий. Структура подсистемы дискретного вывода приведена на рис. 3.22. Основными элементами подсистемы являются  $N$ -разрядный регистр  $R_r$  и выходные усилители ВУ, обеспечивающие совместимость выходов подсистемы со входами исполнительных устройств. Все действия подсистемы координируются встроенным контроллером, который включает в себя схему управления, работающую по программе, записанной в РПЗУ.

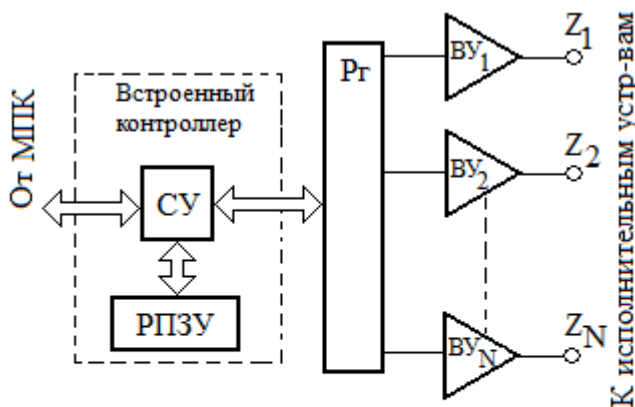


Рис. 3.22. Подсистема дискретного вывода

СУ – схема управления;  
РПЗУ – репрограммируемое ПЗУ;  
 $R_r$  – выходной регистр;  
ВУ – выходной усилитель

контроллером, который включает в себя схему управления, работающую по программе, записанной в РПЗУ. Вывод дискретных управляющих воздействий осуществляется в виде кодовых комбинаций, разрядность которых соответствует разрядности МПК. На логическом уровне каждый разряд такой кодовой комбинации эквивалентен управляющему дискретному сигналу.

Выходные усилители подсистемы представляют собой ключевые схемы, построенные аналогично выходным усилителям электронных регуляторов (рис. 2.13), и могут функционировать в активном или пассивном режиме. Активные элементы формируют на выходе унифицированные сигналы напряжения или тока с заданными логическими уровнями, а пассивные – обеспечивают коммутацию внешних электрических цепей.

Во многих случаях элементы подсистем дискретного вывода применяются для управления электродвигателями исполнительных механизмов с помощью реверсивных пускателей. При этом для управления одним электродвигателем используются два канала вывода – один из них формирует командный сигнал «Больше», другой – командный сигнал «Меньше».



### 3.6. Управление исполнительными устройствами в АСУТП

В автоматизированных системах управления химико-технологическими процессами традиционно используются регулирующие дроссельные исполнительные устройства с электрическим или пневматическим приводом, а также отсечные (запорные) исполнительные устройства с электромагнитным, электродвигательным или пневматическим приводом.

Относительно недавно (в 80-х годах прошлого века) появился новый тип исполнительных устройств, позволяющий управлять расходами технологических сред, не прибегая к дросселированию потоков. Это – побудители расхода (насосы, вентиляторы, газодувки) с электрическим приводом, управление которым осуществляется с помощью частотных преобразователей.

#### 3.6.1. Управление регулирующими клапанами с пневматическим приводом

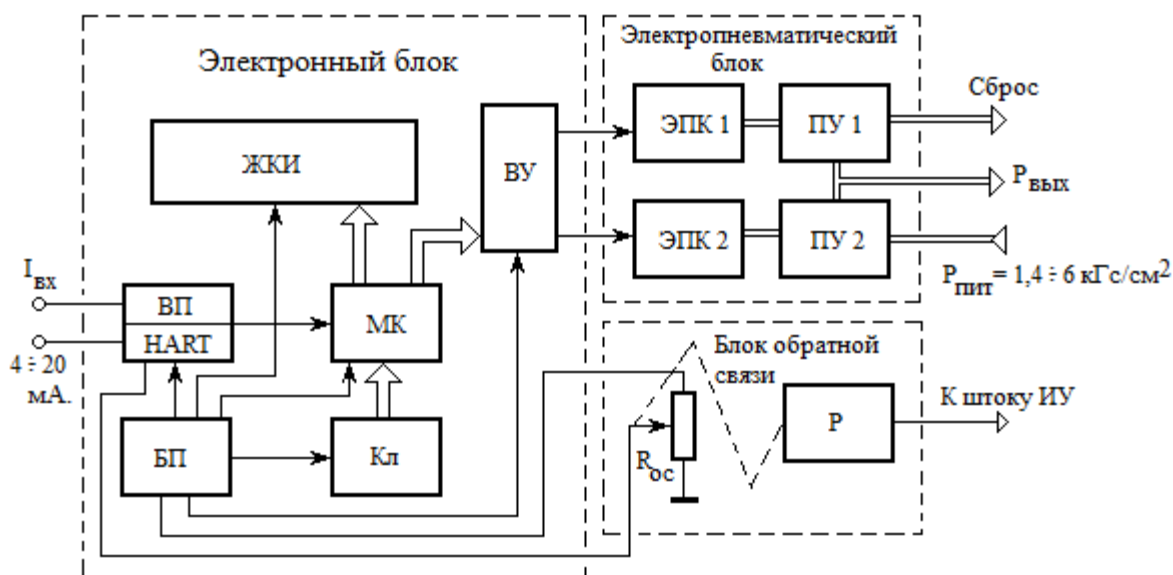


Рис. 3.23. Электропневматический позиционер (ЭПП-300):

- ЖКИ – жидкокристаллический индикатор;
- ВП – входной преобразователь
- БП – блок питания;
- МК – встроенный микроконтроллер;
- Кл – клавиатура;
- ВУ – выходной усилитель;
- ЭПК – электропневмоклапан;
- ПУ – пневмоусилитель;
- Р – редуктор;
- $R_{ос}$  – резистор обратной связи

Клапаны с пневмоприводом широко применяются в системах управления химико-технологическими процессами в силу своей пожаро- и взрывобезопасности. Для управления регулирующими клапанами с пневматическим приводом используются специализированные преобразователи – электропневматические позиционеры.

Электропневматический позиционер предназначен для обеспечения линейной зависимости между величиной управляющего сигнала (обычно – токового сигнала в диапазоне  $4\div 20$  мА) и положением пневматического исполнительного механизма поступательного или поворотного действия. Структура электропневматического позиционера ЭПП-300 приведена на рис. 3.23.

Позиционер состоит из трех блоков: электронного блока, электропневматического блока и блока обратной связи. Электронный блок является информационной системой на базе встроенного микропроцессорного контроллера и предназначен для обработки сигналов управления и обратной связи, питания всех подсистем позиционера, индикации и кнопочного управления его состоянием в режимах настройки и работы.

Позиционер имеет встроенный HART-модем, который позволяет по токовой петле производить обмен информацией с управляющим устройством. При этом имеется возможность управления исполнительным устройством либо по аналоговой, либо по HART-линии (но не одновременно). Наличие такого модема существенно облегчает интеграцию позиционера в современной АСУТП.

Электропневматический блок представляет собой дискретный двухкаскадный двухканальный усилитель-преобразователь с электропьезоклапаном в первом каскаде и мембранным пневмоусилителем – во втором. Объединенный выход вторых каскадов обеспечивает питание исполнительного механизма в режиме нагнетания или сброса.

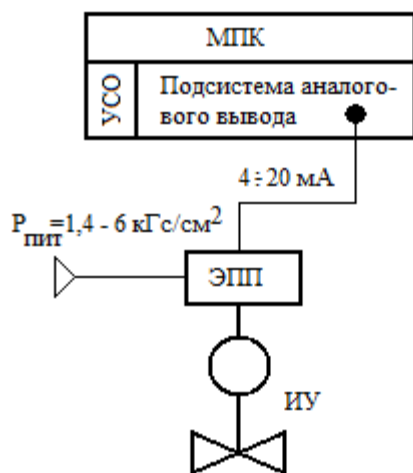


Рис. 3.24. Управление регулирующим клапаном с пневматическим приводом

Блок обратной связи предназначен для формирования электрического сигнала, пропорционального текущему положению исполнительного механизма. Этот блок состоит из поворотного потенциометра и однокаскадного шестеренного редуктора, обеспечивающего использование полного диапазона потенциометра при перемещении исполнительного механизма.

Позиционер может работать в ручном или автоматическом режиме. В автоматическом режиме источником управляющего сигнала могут быть токовая петля или команда HART- протокола.

При установке в систему управления позиционер монтируется непосредственно на исполнительном устройстве и подключается к одному из выходов подсистемы аналогового вывода УСО (рис. 3.24). Все электропневматические позиционеры являются взрывозащищенными устройствами и могут использоваться в помещениях любой категории пожаро- и взрывоопасности.

### 3.6.2. Управление отсечными клапанами с пневматическим приводом

Отсечные клапаны применяются для автоматического открытия или перекрытия потока жидких и газообразных сред в соответствии с управляющим сигналом. Время закрытия (открытия) клапана в стандартном варианте составляет 5 – 6 секунд. Отсечной клапан конструктивно отличается от регулирующего клапана специальным запорным узлом и навесным оборудованием.

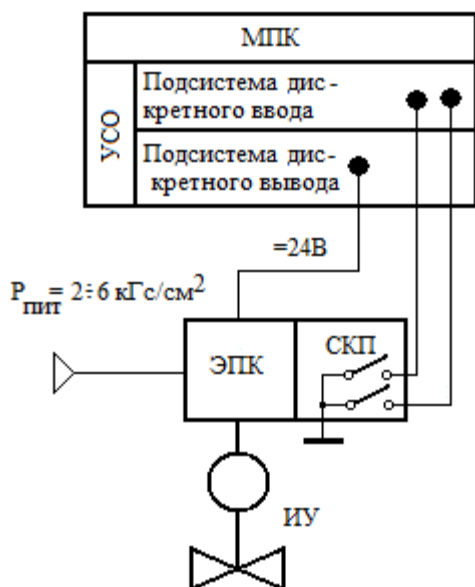


Рис. 3.25. Управление отсечным клапаном с пневматическим приводом:  
ЭПК – электропневматический клапан (распределитель);  
СКП – сигнализатор конечных положений

Управление отсечными клапанами с мембранным пневмоприводом осуществляется с помощью электромагнитного клапана за счет подачи или снятия напряжения 24 В, 110 В, 220 В, постоянного тока или 220 В переменного тока. При этом перестановка клапана осуществляется либо давлением воздуха, либо усилием пружины. Многие клапаны комплектуются концевыми выключателями, сигнализирующими установку регулирующего органа в крайние положения. Питание пневмопривода осуществляется сжатым воздухом с давлением 2 ÷ 6 кгс/см<sup>2</sup>. Схема управления отсечным клапаном приведена на рис. 3.25.

Электропневматический клапан и сигнализатор конечных положений выпускаются в взрывозащищенном исполнении, что позволяет использовать отсечные клапаны в помещениях любой категории пожаро- и взрывоопасности.

### 3.6.3. Управление регулирующими и отсечными клапанами с электрическим приводом

Регулирующие и отсечные клапаны комплектуются электрическими исполнительными механизмами на основе однофазных или трехфазных электродвигателей. Исполнительные механизмы преобразуют управляющие дискретные сигналы в поступательное или угловое перемещение. Управление электродвигателями исполнительных механизмов осуществляется с помощью бесконтактных реверсивных пускателей (рис. 3.26). Управляющие сигналы «Больше» и «Меньше» формируются подсистемой дискретного вывода. Для управления каждым регулирующим или отсечным клапаном используются два канала вывода. Блокировка управляющих сигналов при установке ИМ в крайние положения может осуществляться реверсивным пускателем с по-

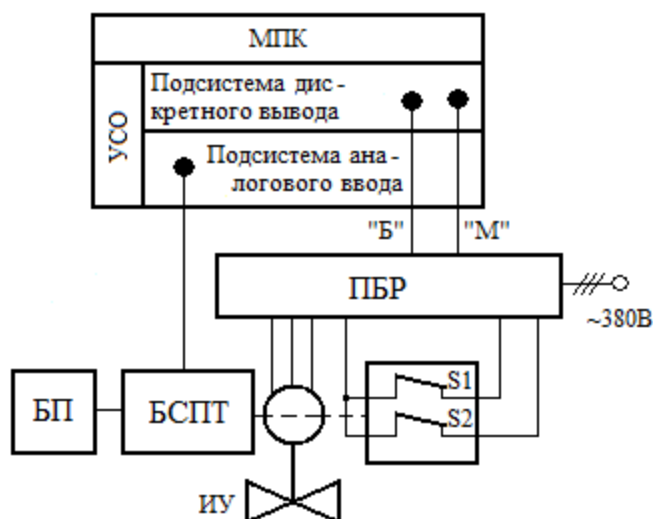


Рис. 3.26. Управление регулирующим (отсечным) клапаном с электрическим приводом:

ПБР – реверсивный пускатель;  
 S1, S2 – концевые выключатели;  
 БСПТ – датчик положения ИМ;  
 БП – блок питания

этом осуществляется:

- индикация направления движения ИМ;
- индикация установки ИМ в крайние положения;
- местное управление ИМ;
- индикация возникающих неисправностей ИМ и блока датчиков.

Производителями рекомендовано использование подобных ИМ совместно с ПБР, укомплектованными микропроцессорным блоком управления (например, ПБР-3-9С). Исполнительные механизмы на базе трехфазных электродвигателей могут выпускаться во взрывозащищенном исполнении, что позволяет использовать соответствующие регулирующие и отсечные клапаны в помещениях любой категории пожаро- и взрывоопасности.

### 3.6.4. Управление электродвигателями с помощью частотных преобразователей

В большинстве химико-технологических процессов традиционным способом регулирования давлений и расходов жидких и газообразных технологических сред является дросселирование потоков. Данный способ регулирования сопровождается значительными потерями энергии и существенно снижает КПД источников давления и побудителей расхода. Более эффективным способом регулирования является непосредственное воздействие на источники давления или побудители расхода путем изменения скорости вращения электродвигателей, приводящих в движение указанные объекты. Наиболее эффективным способом управления скоростью вращения асинхронного электродвигателя является использование частотных преобразователей.

мощью концевых выключателей ИМ (S1, S2) без участия МПК. Датчик положения БСПТ формирует унифицированный токовый сигнал, пропорциональный по величине перемещению ИМ. Этот сигнал передается в подсистему аналогового ввода и далее используется МПК для идентификации положения регулирующего органа.

Многие исполнительные механизмы комплектуются блоком датчиков со встроенным микропроцессорным контроллером. Блок датчиков осуществляет обмен информацией с ПБР и МПК по цифровому каналу (стандарт RS-485). При

По принципу работы частотный преобразователь (рис. 3.27) представляет собой трехфазный генератор синусоидального напряжения с управляемой

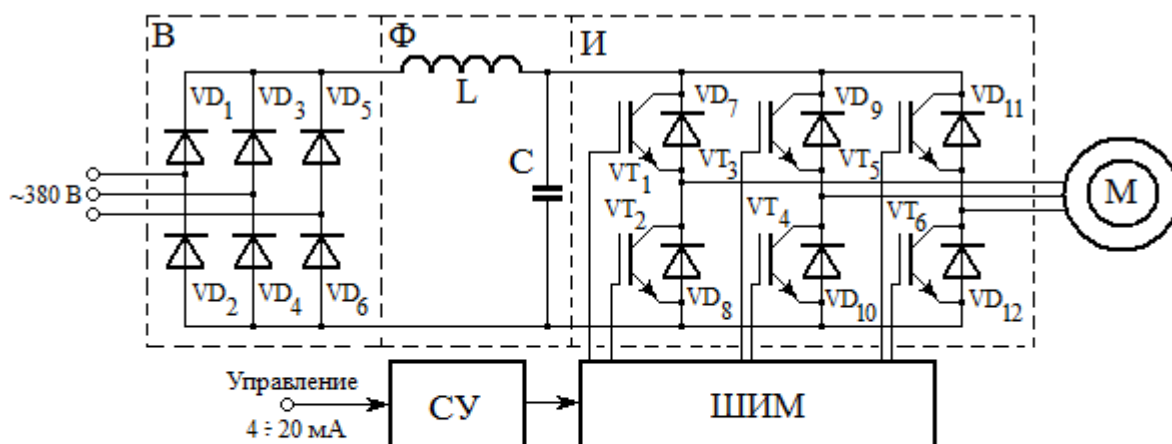


Рис. 3.27. Структура частотного преобразователя:

- В - выпрямитель;
- Ф - фильтр;
- И - инвертор;
- М - электродвигатель;
- ШИМ - широтно-импульсный модулятор;
- СУ - схема управления

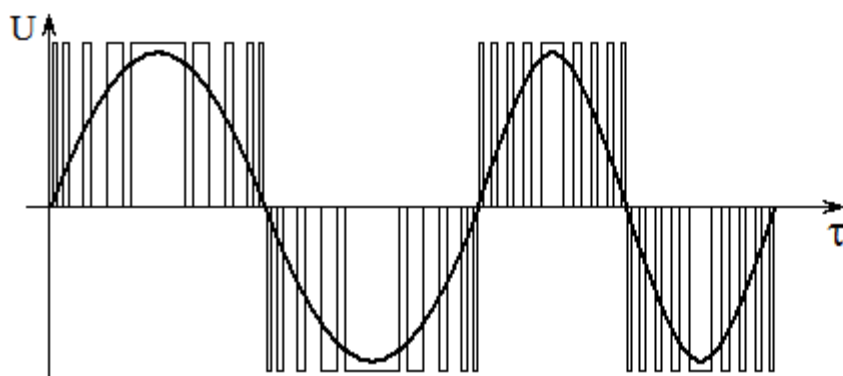


Рис. 3.28. Управление частотой с помощью широтно-импульсной модуляции

вертор **И**, который представляет собой мостовую трехфазную схему из шести силовых транзисторов

$VT_1 \div VT_6$  с диодами защиты от пробоя напряжениями обратной полярности  $VD_7 \div VD_{12}$ . Инвертор работает под управлением широтно-импульсного модулятора **ШИМ**, который формирует трехфазную последовательность управляющих импульсов с переменной длительностью. Выходные сигналы **ШИМ** управляют переключениями силовых транзисторов, которые формируют на обмотках электродвигателя импульсы напряжения положительной и отрицательной поляр-

частотой.

Напряжение промышленной сети подается на выпрямитель **В**, который совместно фильтром **Ф** формирует постоянное напряжение с ограниченной величиной пульсаций. Выпрямленное напряжение подается на ин-

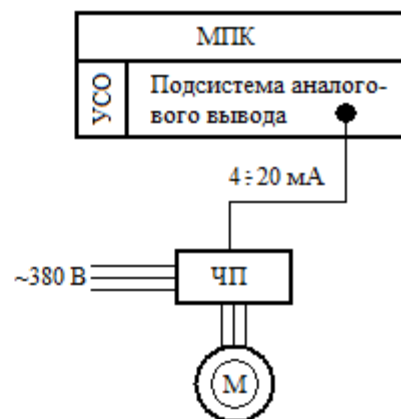


Рис. 3.29. Управление электродвигателем с помощью частотного преобразователя

ности (рис. 3.28). Тактовая частота **ШИМ** довольно высока (до 15–20 кГц), поэтому обмотки электродвигателя, обладающие индуктивным сопротивлением, сглаживают выходные импульсы инвертора до синусоидальной формы.

Внешнее управление частотным преобразователем осуществляется с помощью унифицированного токового сигнала  $4\div 20$  мА, формируемого подсистемой аналогового вывода УСО (рис. 3.29), через схему управления СУ, координирующую работу широтно-импульсного модулятора.

### 3.6.5. Управление электродвигателями с помощью магнитных пускателей

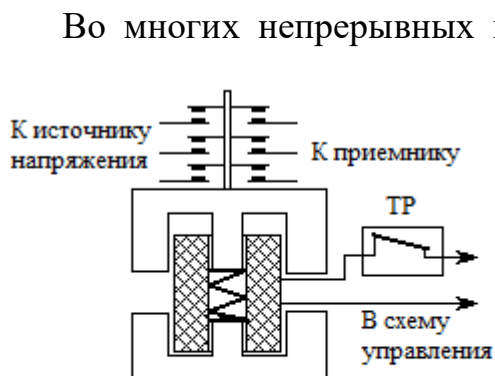


Рис. 3.30. Устройство электромагнитного пускателя

Во многих непрерывных и, особенно, периодических технологических процессах часто возникает задача управления включением/выключением электродвигателей приводов различных механизмов – насосов, мешалок, транспортеров и др. Для реализации этой функции в локальных системах управления и в АСУТП используются электромагнитные (магнитные) пускатели, позволяющие осуществлять дистанционный пуск и останов электродвигателей. Устройство пускателя иллюстрирует рис. 3.30.

Напряжение питания подается на катушку пускателя, в катушке возникает магнитное поле, втягивающее внутрь катушки металлический сердечник, к которому прикреплена группа силовых (рабочих) контактов. Контакты замыкаются и подключают приемник (электродвигатель, электронагреватель и др.) к источнику напряжения. При снятии управляющего напряжения пружина выталкивает сердечник из катушки, и контакты размыкаются. В зависимости от типа оборудования, подключаемого через пускатель, его мощности и условий работы, применяются пускатели различных типов исполнения с различным значением максимально допустимого коммутируемого тока.

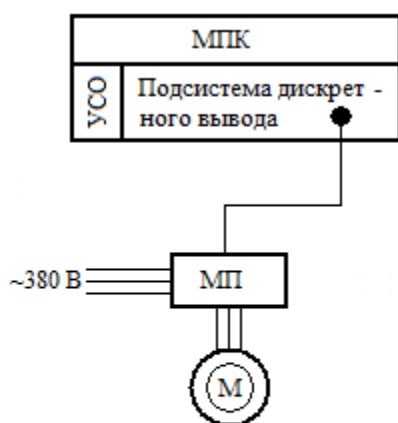


Рис. 3.31. Управление электродвигателем с помощью магнитного пускателя

Для защиты контактной группы от перегрузок пускатель комплектуется встроенным тепловым реле ТР, которое размыкает цепь питания катушки при длительном превышении предельного значения коммутируемого тока. Некоторые пускатели имеют встроенные кнопки управления, предназначенные для местного управления включением/выключением потребителей.

В АСУТП сигналы управления магнитными пускателями формируются подсистемой дискретного вывода (рис. 3.31). В управлении участвуют пассивные элементы подсистемы,

позволяющие управлять пускателями произвольной мощности, но требующие использования внешнего источника питания.

### 3.7. Стандартные интерфейсы АСУТП

Обмен информацией между устройствами, входящими в состав автоматизированной системы (компьютерами, контроллерами, датчиками, исполнительными устройствами), происходит в общем случае через промышленную сеть. Взаимодействие между составными частями системы организуется в рамках того или иного *интерфейса*, под которым понимают совокупность:

- правил и алгоритмов обмена информацией между функциональными блоками (ФБ) системы;
- технических средств, реализующих указанные правила и обеспечивающих сопряжение ФБ;
- признаков информационной, энергетической и конструктивной совместимости ФБ.

По отношению к операциям обмена понятие функционального блока может относиться к любому устройству, участвующему в обмене – датчику, исполнительному устройству, контроллеру и др.

#### 3.7.1. Классификация стандартных интерфейсов

В настоящее время большая часть информации, используемой в АСУТП, представлена в цифровом виде, поэтому достаточно полно разработаны только цифровые интерфейсы, регламентирующие работу цифровых устройств и цифровых частей аналого-цифровых и цифроаналоговых ФБ. Используемые в АСУТП стандартные интерфейсы классифицируются по нескольким признакам (табл.3.2).

Таблица 3.2

Классификация стандартных интерфейсов

Классификационные признаки	Типы интерфейсов	
	Централизованный	Децентрализованный
Характер управления	Централизованный	Децентрализованный
Организация системы шин	Индивидуальная (радиальная)	Коллективная (магистральная)
Специализация линий связи в системе шин	Объединенная	Раздельная
Порядок выполнения операций обмена	Последовательный	Параллельный
Наличие синхронизации	Синхронный	Асинхронный
Типы объединяемых ФБ	Источники	Приемники
Унификация питания	Да	Нет
Унификация конструктива	Да	Нет

В интерфейсах с централизованным управлением все операции обмена выполняются по командам (и под контролем) управляющего устройства, в качестве которого может выступать программируемый микропроцессорный контроллер или промышленная ЭВМ. В интерфейсах с децентрализованным управлением функции управляющего устройства выполняет один из ФБ, участвующих в конкретном цикле обмена.

Система линий связи (шин), по которым производится обмен информацией, может иметь радиальную или магистральную структуру (рис. 3.32).

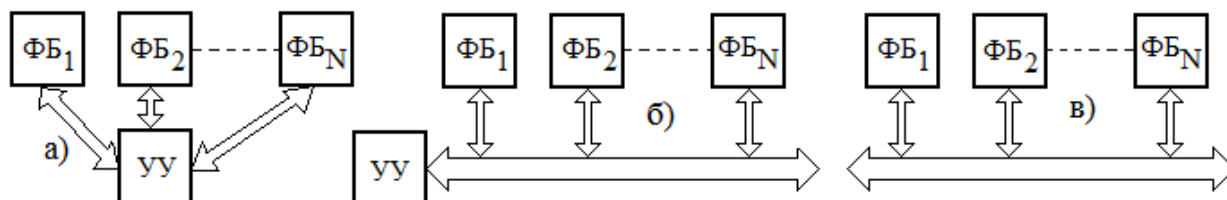


Рис. 3.32. Структура системы шин: радиальная(а); магистральная в централизованном интерфейсе (б) и магистральная в децентрализованном интерфейсе (в)

Для интерфейсов с централизованным управлением структура системы шин может быть как радиальной, в которой каждый функциональный блок имеет индивидуальные линии связи с управляющим устройством, так и магистральной, в которой все линии связи являются общими для всех функциональных блоков и управляющего устройства. Для интерфейсов с децентрализованным управлением предпочтительна магистральная организация системы шин, которая обеспечивает большую функциональную гибкость технического и алгоритмического обеспечения системы управления. В некоторых интерфейсах с централизованным управлением система шин является комбинированной (радиально-магистральной) – определенная группа шин является общей для всех функциональных блоков и управляющего устройства и, вместе с тем, управляющее устройство имеет индивидуальные линии связи с каждым функциональным блоком.

По специализации функционального назначения линий связи система шин может быть объединенной или раздельной. В объединенной системе шин передача информационных, командных, служебных и вспомогательных сообщений ведется по одним и тем же линиям связи. В раздельной системе шин для передачи сообщений каждого вида выделяется определенная группа линий связи.

При обмене цифровыми сообщениями можно использовать последовательный или параллельный способ. При последовательном способе обмена для передачи сообщения форматом в  $n$  бит необходимо организовать  $n$  элементарных циклов обмена. В этом случае шина, по которой идет обмен, может состоять всего из одной линии связи. При параллельном способе передача сообщения форматом в  $n$  бит происходит в рамках одной элементарной операции, однако шина, используемая для обмена, должна включать  $n$  линий связи. Во многих интерфейсах используется комбинированный, последовательно-параллельный способ. При этом сообщение форматом в  $n$  бит разделяется на  $m$  групп по  $q$  бит в каждой. Передача сообщения выполняется за  $m$



последовательных элементарных операций по шине, включающей  $q$  линий связи.

Обмен информацией в системе может быть синхронным или асинхронным. Синхронная передача данных по линиям связи производится в фиксированные моменты времени, определяемые специально организованной последовательностью синхросигналов. Данные, не сопровождаемые синхросигналами, считаются недостоверными и игнорируются системой. Эффективное использование синхронного метода обмена возможно только тогда, когда все функциональные блоки системы имеют одинаковое быстродействие. В противном случае предпочтительным является асинхронный метод.

Темп асинхронного обмена определяется приемником информации, который перед началом обмена сообщает источнику (или управляющему устройству) о готовности принять данные, а по окончании приема выдает источнику (управляющему устройству) сигнал подтверждения приема (квитирования). В данном случае обмен производится в произвольные моменты времени, что позволяет существенно повысить темп обмена (по сравнению с синхронным методом) при том же быстродействии всех участников обмена.

Все функциональные блоки системы по их отношению к операциям обмена можно разделить на источники, предназначенные для выдачи информации другим ФБ, приемники, получающие информацию от других ФБ, и приемники-источники, предназначенные как для приема, так и для выдачи информации. ФБ, выступающие инициаторами обмена, называют активными, а ФБ, выполняющие обмен только по командам извне, – пассивными.

Обязательным требованием к техническим средствам интерфейса является только обеспечение информационной совместимости, однако в некоторых случаях интерфейс обеспечивает энергетическую и конструктивную совместимость ФБ.

### **3.7.2. Протоколы и типовые алгоритмы обмена информацией**

Протокол обмена информацией (логический интерфейс) – это набор информационных сообщений определенного формата, которыми обмениваются два устройства или две программы, а также набор правил, определяющих логику обмена этими сообщениями. Протокол обмена определяет алгоритм взаимодействия двух или более устройств, соединенных друг с другом физическими линиями связи. Поскольку обмен данными происходит в рамках той или иной сети, протоколы обмена являются неотъемлемой частью сетевых алгоритмов.

В начале 80-х годов прошлого века ряд международных организаций по стандартизации, в частности International Organization for Standardization (ISO) и некоторые другие, разработали стандартную модель взаимодействия открытых систем (Open System Interconnection, OSI). Эта модель сыграла значительную роль в развитии компьютерных сетей. Модель OSI предполагает определенную иерархию уровней организации операций обмена. Каждому уровню соответствует определенный протокол обмена. Протоколы высших

уровней включают в себя (инкапсулируют) протоколы всех низших уровней, в результате чего взаимодействие участников обмена наделяется определенными свойствами и характеристиками.

В модели OSI средства взаимодействия делятся на семь уровней: прикладной, уровень представления, сеансовый, транспортный, сетевой, канальный и физический в соответствии с рис. 3.33. Каждый уровень имеет дело с

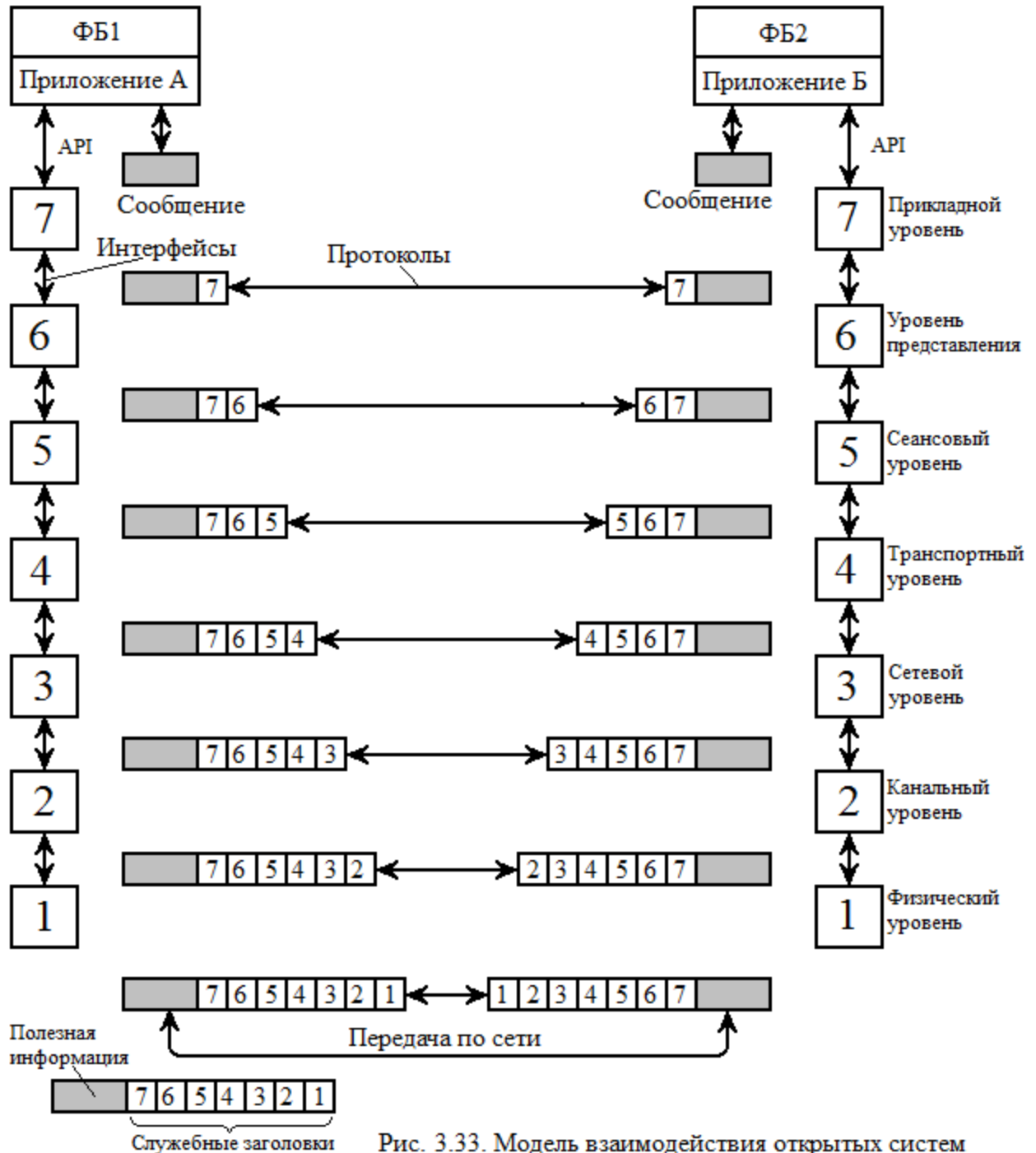


Рис. 3.33. Модель взаимодействия открытых систем

совершенно определенным аспектом взаимодействия сетевых устройств. Физический уровень характеризует передачу потока битов по физическим каналам связи, таким как коаксиальный кабель, витая пара, оптоволоконный кабель или цифровой территориальный канал. Функции физического уровня реализуются на всех устройствах, подключенных к сети.

Канальный уровень обеспечивает: установление логического соединения между взаимодействующими узлами; согласование в рамках соединения скоростей передатчика и приемника информации; обеспечение надежной передачи, обнаружение и коррекцию ошибок.

Сетевой уровень служит для образования единой транспортной системы, объединяющей несколько сетей, называемой составной сетью или Интернетом.

Транспортный уровень обеспечивает приложениям или верхним уровням модели (прикладному, представления и сеансовому) передачу данных с той степенью надежности, которая им требуется.

Сеансовый уровень управляет взаимодействием сторон: фиксирует, какая из сторон является активной в настоящий момент, и предоставляет средства синхронизации сеанса.

Уровень представления, как следует из его названия, обеспечивает представление передаваемой по сети информации, не меняя при этом ее содержания. За счет уровня представления информация, передаваемая прикладным уровнем одной системы, всегда понятна прикладному уровню другой системы.

Прикладной уровень – это в действительности просто набор разнообразных протоколов, с помощью которых пользователи сети получают доступ к разделяемым ресурсам, таким как файлы, принтеры или гипертекстовые веб-страницы, а также организуют свою совместную работу, например, по протоколу электронной почты. Набор инкапсулирующих друг друга протоколов, сформированный под специфичную сетевую архитектуру, принято называть «стеком протоколов».

Каждый протокол обмена устанавливает единицу обмениваемой информации, формат сообщений, применяемый код, набор информационных, управляющих, сопровождающих и вспомогательных сигналов, набор интерфейсных функций, логические и временные соотношения между сигналами, способ синхронизации, способ формирования и идентификации запросов на обслуживание, правила адресации и способ контроля достоверности обмена.

### **3.7.3. Протокол обмена MODBUS**

Протокол Modbus и сеть Modbus фирмы «Modicon» являются самыми распространенными в мире. Несмотря на свой возраст (стандартом де-факто Modbus стал еще в 1979 году), Modbus не только не устарел, но, наоборот, существенно возросло количество новых разработок и объем организационной поддержки этого протокола.

Несомненными достоинствами протокола Modbus является отсутствие необходимости применения специальных интерфейсных контроллеров (протоколы Profibus и CAN требуют для своей реализации заказные микросхемы), простота программной реализации и принципов функционирования.

Modbus имеет высокую достоверность передачи данных, связанную с применением надежного метода контроля ошибок. Данный протокол позволя-

ет унифицировать команды обмена благодаря стандартизации номеров (адресов) регистров и функций их чтения-записи.

Основным недостатком Modbus является организация обмена по типу "ведущий/ведомый", что не позволяет ведомым устройствам передавать данные по мере их появления и поэтому требует интенсивного опроса ведомых устройств ведущим.

Протокол Modbus имеет два режима передачи: RTU (Remote Terminal Unit – «удаленное терминальное устройство») и ASCII. Стандарт предусматривает, что режим RTU в протоколе Modbus должен присутствовать обязательно, а режим ASCII является опционным (в России практически не используется).

Стандарт Modbus предусматривает применение физического интерфейса RS-485, RS-422 или RS-232. Наиболее распространенным для организации промышленной сети является 2-проводной интерфейс RS-485. Для соединений точка-точка может быть использован интерфейс RS-232 или RS-422.

В стандарте Modbus имеются обязательные требования, рекомендуемые и опционные (необязательные). Существует три степени соответствия стандарту:

- «полностью соответствует» – когда протокол соответствует всем обязательным и всем рекомендуемым требованиям;
- «условно соответствует» – когда протокол соответствует только обязательным требованиям и не соответствует рекомендуемым;
- «не соответствует».

Модель OSI протокола Modbus содержит три уровня: физический, канальный и прикладной (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Модель OSI для Modbus

Номер уровня	Название уровня	Реализация
7	Прикладной	MODBUS Application Protocol
6	Уровень представления	Нет
5	Сеансовый	Нет
4	Транспортный	Нет
3	Сетевой	Нет
2	Канальный (передачи данных)	Протокол "ведущий/ведомый" Режимы RTU и ASCII
1	Физический	RS-485 или RS-232

#### *Физический уровень*

В новых разработках на основе Modbus стандарт рекомендует использовать интерфейс RS-485 с двухпроводной линией передачи, но допускается применение четырехпроводной линии и интерфейса RS-232. Modbus-шина должна состоять из одного магистрального кабеля, от которого могут быть

сделаны отводы. Магистральный кабель Modbus должен содержать 3 проводника в общем экране, два из которых представляют собой витую пару, а третий соединяет общие выводы всех интерфейсных блоков RS-485 в сети. Общий провод и экран должны быть заземлены в одной точке, желательно около ведущего устройства. Устройства могут подключаться к кабелю тремя способами:

- непосредственно к магистральному кабелю;
- через пассивный разветвитель (тройник);
- через активный разветвитель (содержащий развязывающий повторитель интерфейса).

В документации на устройство и на тройник должны быть указаны наименования подключаемых цепей. На каждом конце магистрального кабеля должны быть установлены резисторы для согласования линии передачи, как это требуется для интерфейса RS-485.

Modbus-устройство обязательно должно поддерживать скорости обмена 9600 бит/с и 19200 бит/с, из них 19200 бит/с устанавливается "по умолчанию". Допускаются также скорости 1200, 2400, 4800, ..., 38400 бит/с, 65 кбит/с, 115 кбит/с, и т. д. Скорость передачи должна выдерживаться в передатчике с погрешностью не хуже 1 %. Приемник должен принимать данные при отклонении скорости передачи до 2 %. Сегмент сети, не содержащий повторителей интерфейса, должен допускать подключение до 32 устройств, однако их количество может быть увеличено, если это допустимо исходя из нагрузочной способности передатчиков и входного сопротивления приемников, которые должны быть приведены в документации на интерфейсы. Максимальная длина магистрального кабеля при скорости передачи 9600 бит/с и сечении жил более  $0,13 \text{ мм}^2$  (AWG26) составляет 1 км. Отводы от магистрального кабеля не должны быть длиннее 20 м. При использовании многопортового пассивного разветвителя с N отводами длина каждого отвода не должна превышать значения  $40 \text{ м}/N$ . Волновое сопротивление кабеля желательно выбирать более 100 Ом, особенно для скорости обмена более 19200 бит/с.

### *Канальный уровень*

Протокол Modbus предполагает, что только одно ведущее устройство (контроллер) и до 247 ведомых (модулей ввода-вывода) могут быть объединены в промышленную сеть. Обмен данными всегда инициируется ведущим. Ведомые устройства никогда не начинают передачу данных, пока не получат запрос от ведущего. Ведомые устройства также не могут обмениваться данными друг с другом. Поэтому в любой момент времени в сети Modbus может происходить только один акт обмена.

Адреса с 1 по 247 являются адресами Modbus устройств в сети, а с 248 по 255 зарезервированы. Ведущее устройство не должно иметь адреса и в сети не должно быть двух устройств с одинаковыми адресами. Ведущее устройство может посылать запросы всем устройствам одновременно ("широковещательный режим") или только одному.

Для широковещательного режима зарезервирован адрес "0" (при использовании в команде этого адреса она принимается всеми устройствами сети).

### Кадр (фрейм) протокола Modbus

В протоколе Modbus RTU сообщение начинает восприниматься как новое после паузы (тишины) на шине длительностью не менее 3,5 символов (14 бит), т. е. величина паузы в секундах зависит от скорости передачи.

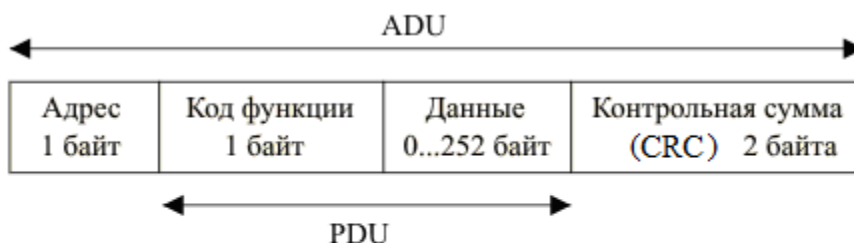


Рис. 3.34. Формат кадра протокола Modbus:

PDU – "Protocol Data Unit" - "элемент данных протокола";

ADU – "Application Data Unit" - "элемент данных приложения"

Формат кадра показан на рис. 3.34. Поле адреса всегда содержит только адрес ведомого устройства, даже в ответах на команду, посланную ведущим. Благодаря этому ведущее устройство знает, от какого модуля пришел ответ. Поле «Код функции» говорит модулю о том, какое действие нужно выполнить. Поле «Данные» может содержать произвольное количество байт. В нем может содержаться информация о параметрах, используемых в запросах контроллера или ответах модуля. Поле «Контрольная сумма» содержит контрольную сумму CRC длиной 2 байта.

### Структура данных в режиме RTU

В режиме RTU данные передаются младшими разрядами вперед (рис. 3.35). По умолчанию в RTU режиме бит паритета устанавливают равным 1, если количество двоичных единиц в байте нечетное, и равным 0, если оно четное. Такой паритет называют четным (even parity) и метод контроля называют контролем четности.

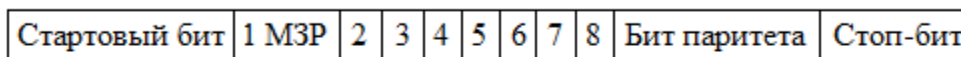


Рис. 3.35. Последовательность битов в режиме RTU

МЗР – младший значащий разряд

При четном количестве двоичных единиц в байте бит паритета может быть равен 1. В этом случае говорят, что паритет является нечетным (odd parity). Контроль четности может отсутствовать вообще. В этом случае вместо бита паритета должен использоваться второй стоповый бит. Для обеспечения максимальной совместимости с другими продуктами рекомендуется использовать возможность замены бита паритета на второй стоповый бит.

Ведомые устройства могут воспринимать любой из вариантов: четный, нечетный паритет или его отсутствие.

### *Структура Modbus RTU сообщения*

Сообщения Modbus RTU передаются в виде кадров, для каждого из которых известны начало и конец. Признаком начала кадра является пауза (тишина) продолжительностью не менее 3,5 шестнадцатеричных символов (14 бит). Кадр должен передаваться непрерывно. Если при передаче кадра обнаруживается пауза продолжительностью более 1,5 шестнадцатеричных символа (6 бит), то считается, что кадр содержит ошибку и должен быть отклонен принимающим модулем. Эти величины пауз должны строго соблюдаться при скоростях ниже 19200 бит/с, однако при более высоких скоростях рекомендуется использовать фиксированные значения паузы, 1,75 мс и 750 мкс соответственно.

### *Контроль ошибок*

В режиме RTU имеется два уровня контроля ошибок в сообщении: контроль паритета для каждого байта (опционно); контроль кадра в целом с помощью CRC метода. CRC метод используется независимо от проверки паритета. Значение CRC устанавливается в ведущем устройстве перед передачей. При приеме сообщения вычисляется CRC для всего сообщения и сравнивается с его значением, указанным в поле CRC кадра. Если оба значения совпадают, считается, что сообщение не содержит ошибки. Стартовые, стоповые биты и бит паритета в вычислении CRC не участвуют.

### *Прикладной уровень*

Прикладной уровень Modbus RTU обеспечивает коммуникацию между устройствами типа "ведущий/ведомый". Прикладной уровень является независимым от физического и канального, в частности, он может использовать протоколы Ethernet TCP/IP (Modbus TCP/IP), Modbus Plus (многомастерная сеть с передачей маркера), интерфейсы RS-232, RS-422, RS-485, оптоволоконные, радиоканалы и другие физические среды для передачи сигналов.

Прикладной уровень Modbus основан на запросах с помощью кодов функций. Код функции указывает ведомому устройству, какую операцию оно должно выполнить.

При использовании протокола прикладного уровня с различными протоколами транспортного и канального уровня сохраняется неизменным основной блок Modbus-сообщения, включающий код функции и данные (этот блок называется PDU – "Protocol Data Unit" – "элемент данных протокола").

К блоку PDU могут добавляться дополнительные поля при использовании его в различных промышленных сетях и тогда он называется "ADU" – "Application Data Unit" – "элемент данных приложения".

### *Коды функций*

Стандартом Modbus предусмотрены три категории кодов функций: установленные стандартом, задаваемые пользователем и зарезервированные. Коды функций являются числами в диапазоне от 1 до 127. Коды в диапазоне от 65 до 72 и от 100 до 110 относятся к задаваемым пользователем функциям, в

диапазоне от 128 до 255 – зарезервированы для пересылки кодов ошибок в ответном сообщении. Код «0» не используется.

Коды ошибок используются ведомым устройством, чтобы определить, какое действие предпринять для их обработки. Значения кодов и их смысл описаны в стандарте на Modbus RTU. Поле данных (рис. 3.34) в сообщении, посланном от ведущего устройства ведомому, содержит дополнительную информацию, которую ведомое использует, чтобы выполнить функцию, указанную в поле «код функции».

Поле данных может содержать значения состояний дискретных входов/выходов, адреса регистров, из которых надо считывать (записывать) данные, количество байт данных, ссылки на переменные, количество переменных, код подфункций и т. п.

Если ведомый нормально выполнил принятую от ведущего функцию, то в ответе поле «код функции» содержит ту же информацию, что и в запросе. В противном случае ведомый выдает код ошибки. В случае ошибки код функции в ответе равен коду функции в запросе, увеличенному на 128.

### **Содержание поля данных**

В сообщении ведущего устройства ведомому поле данных содержит дополнительную информацию, необходимую для выполнения указанной функции. Например, если код функции указывает, что необходимо считать данные из группы регистров устройства ввода (код функции 03 hex), то поле данных содержит адрес начального регистра и количество регистров.

Если ведущее устройство посылает команду записи данных в группу регистров (код функции 10 hex), то поле данных должно содержать адрес начального регистра, количество регистров, количество байтов данных и данные для записи в регистр. Конкретное содержание поля данных устанавливается стандартом для каждой функции отдельно. В некоторых сообщениях поле данных может иметь нулевую длину.

#### **3.7.4. Последовательные интерфейсы RS-422 и RS-485**

Интерфейс RS-485 (другое название – EIA/TIA-485) – один из наиболее распространенных стандартов физического уровня связи. RS-422 и RS-485 – интерфейсы с централизованным управлением, магистральной объединенной системой шин и асинхронным последовательным способом обмена. Требования энергетической и конструктивной совместимости ФБ стандарты данных интерфейсов не содержат. Сеть, построенная по стандарту RS-485, представляет собой приемопередатчики, соединенные при помощи витой пары – двух скрученных проводов. В основе интерфейса RS-485 лежит принцип дифференциальной (балансной) передачи данных (рис. 3.36). Суть его заключается в передаче одного сигнала по двум проводам. Причем по одному проводу (условно А) идет оригинальный сигнал, а по другому (условно В) – его инверсная копия. Другими словами, если на одном проводе "1", то на другом "0", и наоборот. Таким образом, между двумя проводами витой пары всегда есть



разность потенциалов: при "1" она положительна, при "0" – отрицательна . Именно этой разностью потенциалов и передается сигнал.

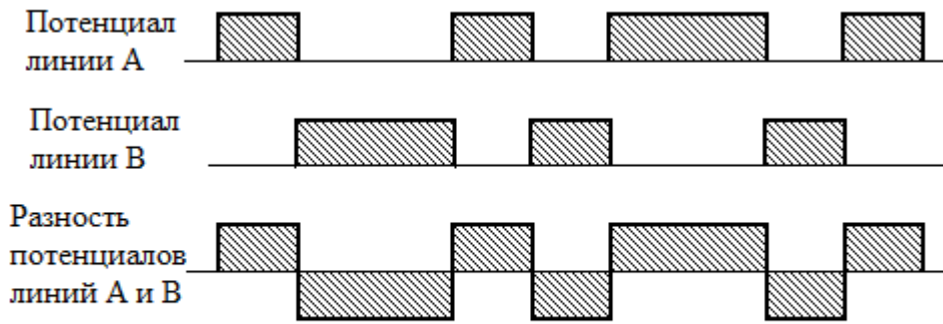


Рис. 3.36. Балансный метод передачи данных

к примеру, электромагнитная волна, проходя через участок линии связи, наводит в обоих проводах потенциал. Если сигнал передается потенциалом в од-

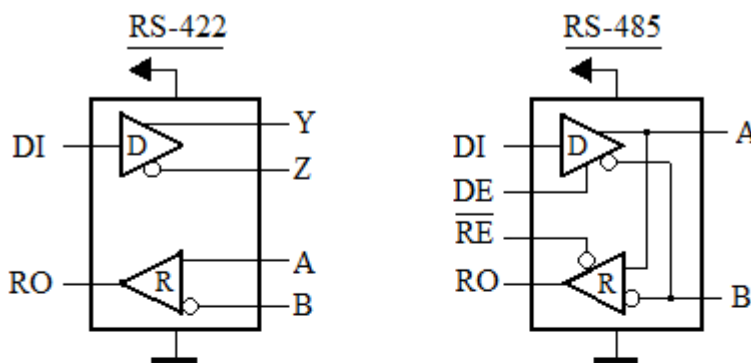


Рис. 3.37. Приемопередатчики интерфейсов

RS-422 и RS-485:

- D (driver) – передатчик;
- R (receiver) – приемник;
- DI (driver input) – цифровой вход передатчика;
- RO (receiver output) – цифровой выход приемника;
- DE (driver enable) – разрешение работы передатчика;
- RE (receiver enable) – разрешение работы приемника;
- A – прямой дифференциальный вход/выход;
- B – инверсный дифференциальный вход/выход;
- Y – прямой дифференциальный выход (RS-422);
- Z – инверсный дифференциальный выход (RS-422)

другу, да еще перевиты, то наводка на оба провода одинакова. Потенциал в обоих одинаково нагруженных проводах изменяется одинаково, при этом информативная разность потенциалов остается без изменений.

Аппаратная реализация интерфейса – микросхемы приемопередатчиков с дифференциальными входами/выходами подключаемыми к линии, и цифровыми портами, подключаемыми к портам UART контроллера (рис. 3.37, 3.38).

UART (универсальный асинхронный приемопередатчик) можно разделить на приемник (Receiver) и передатчик (Transmitter). В состав UART входят: тактовый генератор связи (бодрейт-генератор), управляющие регистры, статусные регистры, буферы и сдвиговые регистры приемника и передатчика.

Такой способ передачи обеспечивает высокую устойчивость к синфазной помехе. Синфазной называют помеху, действующую на оба провода линии одинаково. К

примеру, электромагнитная волна, проходя через участок линии связи, наводит в обоих проводах потенциал. Если сигнал передается потенциалом в одном проводе относительно общего, как в RS-232, то наводка на этот провод может исказить сигнал относительно хорошо поглощающего наводки общего провода. Кроме того, на сопротивлении длинного общего провода будет падать разность потенциалов нулевых проводов источника и приемника – дополнительный источник искажений. А при дифференциальной передаче искажения не происходит. В самом деле, если два провода пролегают близко друг к

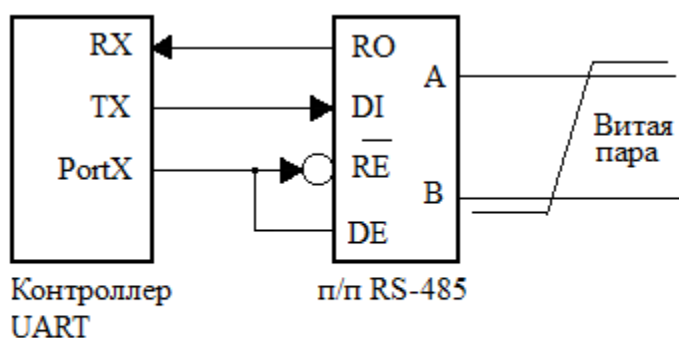


Рис. 3.38. Подключение приемопередатчика RS-485

помещают передаваемый. Сдвиговый регистр передатчика – это обойма, из которой в последовательный порт продвигаются биты передаваемого символа (кадра). Сдвиговый регистр приемника по биту накапливает принимаемые из порта биты. По различным событиям устанавливаются флаги и генерируются прерывания (завершение приема/отправки кадра, освобождение буфера, различные ошибки).

Существуют два варианта такого интерфейса: RS-422 и RS-485. RS-422 – полнодуплексный интерфейс. Прием и передача идут по двум отдельным парам проводов. На каждой паре проводов может быть только по одному передатчику. RS-485 – полудуплексный интерфейс. Прием и передача идут по одной паре проводов с разделением по времени. В сети может быть много передатчиков, так как они могут отключаться в режиме приема. При организации промышленных сетей чаще используют стандарт RS-485.

Цифровой выход приемника (RO) подключается к порту приемника UART (RX). Цифровой вход передатчика (DI) к порту передатчика UART (TX). Поскольку на дифференциальной стороне приемник и передатчик соединены, то во время приема нужно отключать передатчик, а во время передачи - приемник. Для этого служат управляющие входы – разрешение приемника (RE) и разрешение передатчика (DE). Так как вход RE инверсный, то его можно соединить с DE и переключать приемник и передатчик одним сигналом с любого порта контроллера. При уровне "0" – работа на прием, при "1" – на передачу.

Приемник, получая на дифференциальных входах (AB) разность потенциалов, переводит их в цифровой сигнал на выходе RO. Чувствительность приемника может быть разной, но гарантированный пороговый диапазон распознавания сигнала обычно составляет  $\pm 200$  мВ. То есть, когда  $U_{AB} > +200$  мВ - приемник определяет "1", когда  $U_{AB} < -200$  мВ – приемник определяет "0". Если разность потенциалов в линии настолько мала, что не выходит за пороговые значения, правильное распознавание сигнала не гарантируется. Кроме того, в линии могут быть и несинфазные помехи, которые исказят столь слабый сигнал.

Все устройства подключаются к одной витой паре одинаково: прямые выходы (A) к одному проводу, инверсные (B) – к другому. Входное сопротивление приемника со стороны линии (R<sub>AB</sub>) обычно составляет 12 кОм.

Бодрейт-генератор задает тактовую частоту приемопередатчика для данной скорости связи. Управляющие регистры задают режим работы последовательного порта и его прерываний. В статусном регистре устанавливаются флаги по различным событиям. В буфер приемника попадает принятый символ, в буфер передатчика

Так как мощность передатчика не беспредельна, это создает ограничение на количество приемников, подключенных к линии. Согласно спецификации RS-485 к линии можно подключить с учетом согласующих резисторов до 32 приемников. Однако есть ряд микросхем с повышенным входным сопротивлением, что позволяет подключить к линии значительно больше 32 устройств. Максимальная скорость связи по спецификации RS-485 может достигать 10 Мбод. Максимальное расстояние – 1200 м. Если необходимо организовать связь на расстоянии, большем 1200 м или подключить больше устройств, чем допускает нагрузочная способность передатчика – применяют специальные повторители (репитеры).

Таблица 3.4

Стандартные параметры последовательных интерфейсов

Стандартные параметры интерфейсов	RS-422	RS-485
Допустимое число передатчиков / приемников	1 / 10	32 / 32
Максимальная длина кабеля, м	1200	1200
Максимальная скорость связи, Мбит/с	10	10
Диапазон напряжений "1" передатчика, В	+2...+10	+1.5...+6
Диапазон напряжений "0" передатчика, В	-2...-10	-1.5...-6
Диапазон синфазного напряжения передатчика, В	-3...+3	-1...+3
Допустимый диапазон напряжений приемника, В	-7...+7	-7...+12
Пороговый диапазон чувствительности приемника, мВ	±200	±200
Максимальный ток короткого замыкания драйвера, мА	150	250
Допустимое сопротивление нагрузки передатчика, Ом	100	54
Входное сопротивление приемника, кОм	4	12
Максимальное время нарастания сигнала передатчика, % бита	10	30

При больших расстояниях между устройствами, связанными по витой паре и высоких скоростях передачи начинают проявляться так называемые эффекты длинных линий. Причина этому – конечность скорости распространения электромагнитных волн в проводниках. Скорость эта существенно меньше скорости света в вакууме и составляет немногим больше 200 мм/нс. Электрический сигнал имеет также свойство отражаться от открытых концов линии передачи и ее ответвлений. Для коротких линий и малых скоростей передачи этот процесс происходит так быстро, что остается незамеченным. Однако время реакции приемников – десятки/сотни нс. В таком масштабе вре-

мени несколько десятков метров электрический сигнал проходит отнюдь не мгновенно. И если расстояние достаточно большое, фронт сигнала, отразившийся в конце линии и вернувшийся обратно, может исказить текущий или следующий сигнал. В таких случаях нужно каким-то образом подавлять эффект отражения.

У любой линии связи есть такой параметр, как волновое сопротивление  $Z_v$ . Оно зависит от характеристик используемого кабеля, но не от длины. Для обычно применяемых в линиях связи витых пар  $Z_v=120$  Ом. Оказывается, что если на удаленном конце линии, между проводниками витой пары включить резистор с номиналом, равным волновому сопротивлению линии, то электромагнитная волна, дошедшая до "тупика", поглощается на таком резисторе. Отсюда его названия – согласующий резистор или "терминатор".

Эффект отражения и необходимость правильного согласования накладывают ограничения на конфигурацию линии связи. Линия связи должна представлять собой один кабель витой пары. К этому кабелю присоединяются все приемники и передатчики. Расстояние от линии до микросхем интерфейса RS-485 должно быть как можно короче, так как длинные ответвления вносят рассогласование и вызывают отражения.

В оба наиболее удаленных конца кабеля ( $Z_v=120$  Ом) включают согласующие резисторы  $R_t$  по 120 Ом (рис. 3.39). Если в системе только один передатчик и он находится в конце линии, то достаточно одного согласующего резистора на противоположном конце линии.

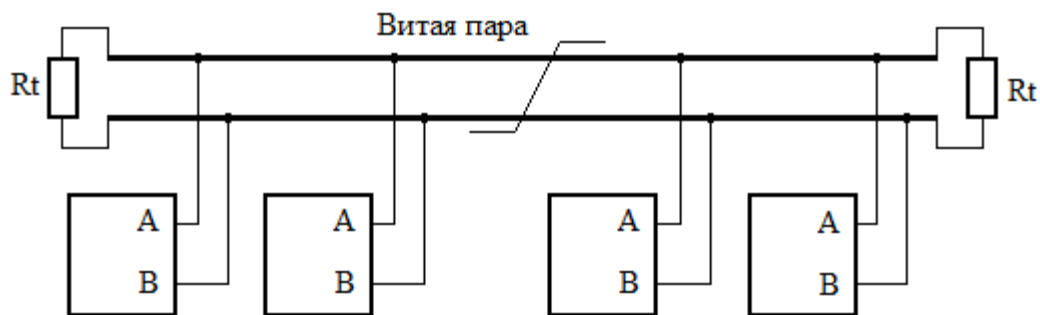


Рис. 3.39. Согласование линий связи в RS-485

### 3.7.5. Обмен информацией по HART-протоколу

HART-протокол (Highway Addressable Remote Transducer – "магистральный адресуемый удаленный преобразователь") является открытым стандартом на метод сетевого обмена, который включает в себя не только протокол взаимодействия устройств, но и требования к аппаратуре канала связи, поэтому устоявшийся термин "протокол", означающий алгоритм взаимодействия устройств, применен здесь не совсем корректно. Стандарт HART был разработан в 1980 году фирмой «Rosemount Inc.», которая позже сделала его открытым.

HART находит применение для связи контроллера с датчиками и измерительными преобразователями, электромагнитными клапанами, локальными контроллерами, для связи с искробезопасным оборудованием.

Несмотря на свое низкое быстродействие (1200 бит/с) и ненадежный аналоговый способ передачи данных, а также появление более совершенных сетевых технологий, устройства с HART-протоколом разрабатываются до сих пор, и объем этого сегмента рынка продолжает расти. Типовой областью применения HART являются достаточно дорогие интеллектуальные устройства (электромагнитные клапаны, датчики потока жидкости, радарные уровнемеры и т. п), а также взрывобезопасное оборудование, где низкая мощность HART-сигнала позволяет легко удовлетворить требованиям стандартов на искробезопасные электрические цепи.

Стандарт HART включает в себя 1-й, 2-й и 7-й уровни модели OSI (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Модель OSI HART-протокола

Номер уровня	Название уровня	HART
7	Прикладной	HART-команды, ответы, типы данных
6	Уровень представления	Нет
5	Сеансовый	Нет
4	Транспортный	Нет
3	Сетевой	Нет
2	Канальный (передачи данных)	Ведущий/ведомый, контрольная сумма, контроль четности, организация потока битов в сообщении, контроль приема сообщений
1	Физический	Наложение цифрового ЧМ сигнала на аналоговый 4-20 мА; медная витая пара

### *Принципы построения*

Разработчики HART-протокола преследовали цель сделать его совместимым с широко распространенным в то время стандартом "токовая петля", но добавить возможности, необходимые для управления интеллектуальными устройствами. Поэтому аналоговая "токовая петля" 4...20 мА была модернизирована таким образом, что получила возможность полудуплексного цифрового обмена данными. Для этого аналоговый сигнал  $A(t)$  суммируется с цифровым сигналом  $D(t)$  (рис. 3.40) и полученная таким образом сумма передается с помощью источника тока 4...20 мА по линии связи. Благодаря существенному различию диапазонов частот аналогового (0...10 Гц) и цифрового (1200 Гц и 2200 Гц) сигналов, они легко могут быть разделены фильтрами низких и высоких частот в приемном устройстве.

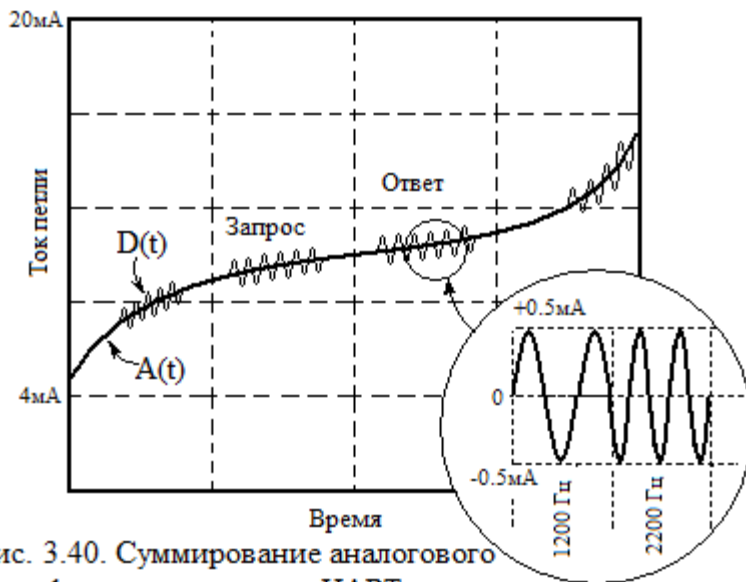


Рис. 3.40. Суммирование аналогового и цифрового сигналов в HART-протоколе

При передаче цифрового двоичного сигнала логическая единица кодируется синусоидальным сигналом с частотой 1200 Гц, ноль – 2200 Гц. При смене частоты фаза колебаний остается непрерывной. Такой способ формирования сигнала называется частотной манипуляцией с непрерывной фазой. Выбор частот соответствует американско-

му стандарту BELL 202 на телефонные каналы связи.

Принцип взаимодействия устройств на физическом уровне модели OSI показан на рис. 3.41. Сопротивление  $R_H$  выбирается так же, как и в токовой петле (стандартом предусмотрена величина 230...1100 Ом), и служит для преобразования тока 4...20 мА в напряжение. Акт взаимодействия устройств инициирует контроллер. Цифровой сигнал от источника напряже-

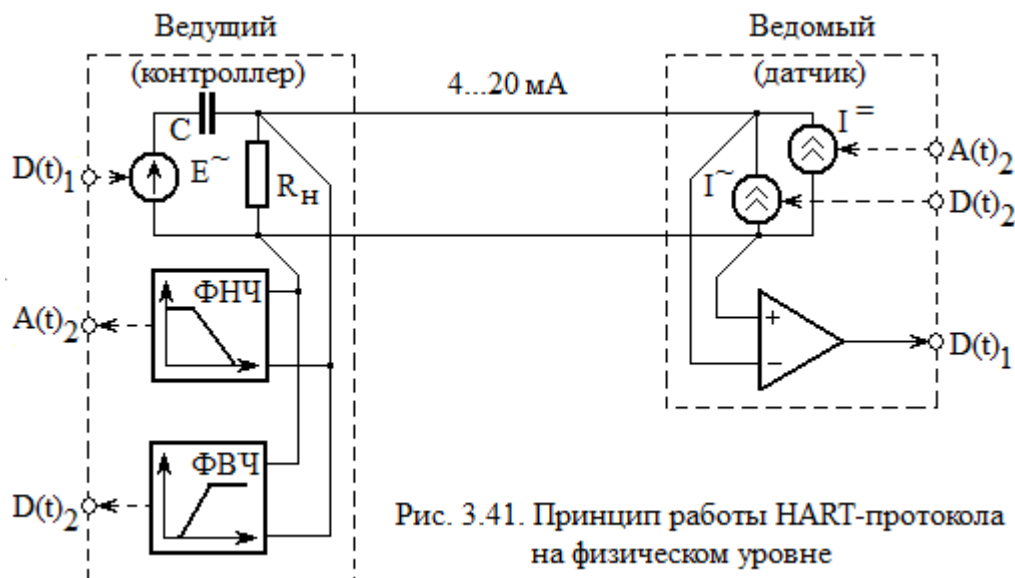


Рис. 3.41. Принцип работы HART-протокола на физическом уровне

ния  $E^{\sim}$  через конденсатор  $C$  подается

в линию передачи и принимается на стороне датчика в форме напряжения в диапазоне от 400 до 800 мВ. Приемник датчика воспринимает HART-сигналы в диапазоне от

120 мВ до 2 В, сигналы от 0 до 80 мВ приемником игнорируются. Получив запрос  $D(t)_1$ , датчик формирует ответ, который в общем случае может содержать как аналоговый  $A(t)_2$ , так и цифровой  $D(t)_2$  сигналы. Аналоговый сигнал обычно содержит информацию об измеренной величине, а цифровой – информацию о единицах и диапазоне измерения, о выходе величины за границы динамического диапазона, о типе датчика, имени изготовителя и др. Аналоговый и цифровой сигналы суммируются и подаются в линию связи в форме тока (рис. 3.40, 3.41). На стороне контроллера ток преобразуется в напряжение резистором  $R_H$ . Полученный сигнал подается на фильтр нижних частот с

частотой среза 10 Гц и на фильтр верхних частот с частотой среза 400...800 Гц. На выходе фильтров выделяются цифровой  $D(t)_2$  и аналоговый  $A(t)_2$  сигналы. При использовании фильтров второго порядка погрешность, вносимая цифровым сигналом в аналоговый, составляет всего 0,01% от 20 мА.

Как и в обычной "токовой петле", источник тока в HART-устройстве может иметь внешний или встроенный источник питания.

В частном случае HART-протокол может использовать только цифровой или только аналоговый сигнал 4...20 мА.

В случае, когда ведомым устройством является не датчик, а исполнительное устройство (например, электромагнитный клапан), аналоговый сигнал в форме тока должен передаваться от ведущего устройства к ведомому и источник тока должен находиться в ведущем устройстве (ситуация, обратная показанной на рис. 3.41). Поскольку HART-устройства содержат микроконтроллер и МОП-ключи, необходимое для этого переконфигурирование передатчика и приемника выполняется путем подачи соответствующей команды.

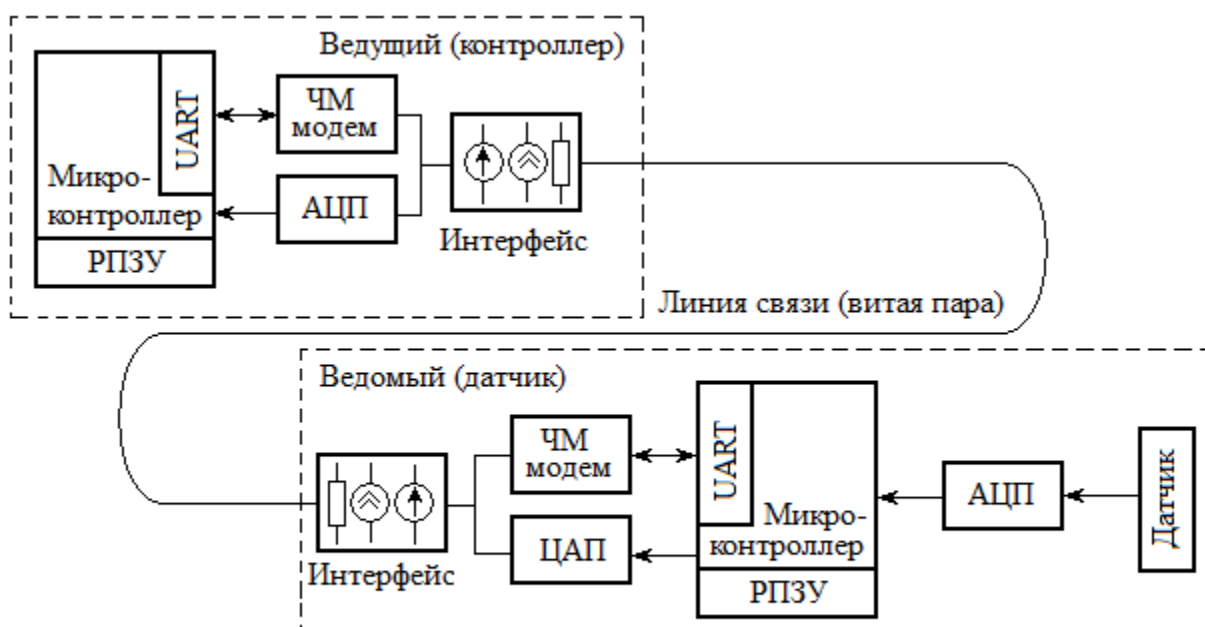


Рис. 3.42. Обмен информацией между контроллером и датчиком по HART-протоколу на канальном уровне

Алгоритм обмена информацией по HART-протоколу на канальном уровне иллюстрирует рис.3.42. Для приема и передачи цифровой информации HART-устройства всегда содержат микроконтроллер с репрограммируемым постоянным запоминающим устройством (РПЗУ) и универсальный асинхронный приемо-передатчик (UART). Цифровой сигнал, сформированный микроконтроллером, преобразуется в UART в непрерывную последовательность бит, состоящую из двоичных слов длиной 11 бит каждое (формат слов аналогичен формату в протоколе Modbus (рис. 3.35)). Сформированная таким образом последовательность нулей и единиц передается в модем, выполняющий частотную манипуляцию (ЧМ). Полученный частотно-манипулированный сигнал передается в интерфейсный блок для формирования напряжения, подаваемого

в линию связи (от контроллера к датчику передается сигнал в форме напряжения, а обратно – в форме тока).

На стороне датчика сигнал принимается из линии интерфейсным блоком, преобразуется ЧМ-модемом в последовательность битов, из которой контроллер выделяет байты данных и биты паритета. Микроконтроллер проверяет соответствие бита паритета переданному байту для каждого переданного слова, пока не обнаружит признак конца сообщения.

Получив команду, контроллер приступает к ее выполнению. Если пришла команда запроса измеренных данных, контроллер датчика принимает через АЦП сигнал датчика, преобразует его в аналоговую форму с помощью ЦАП, суммирует со служебной информацией на выходе ЧМ-модема и передает в линию связи в форме тока 4...20 мА.

### *Сеть на основе HART-протокола*

HART-устройства могут быть объединены в сеть. Для этого используют только цифровую часть HART-протокола, а информация передается в форме напряжения, что позволяет соединять HART-устройства параллельно. Максимальное количество устройств в сети может составлять 15, если не использовать HART-повторители (ретрансляторы, репитеры). HART-сеть может иметь произвольную топологию, поскольку при малых скоростях передачи (1200 бит/с) эффектов, характерных для длинных линий, не возникает. Этим же объясняются крайне низкие требования к полосе пропускания кабеля (2,5 кГц по уровню 3 дБ). Такой полосе соответствует постоянная времени линии передачи 65 мкс, т.е. при сопротивлении линии 250 Ом ее емкость может достигать 0,26 мкФ, что соответствует длине кабеля около 2...3 км (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Предельно допустимые длины кабеля HART-сети

Количество устройств в сети	Длина кабеля, м при погонной емкости, пФ/м			
	65	95	160	225
1	2800	2000	1300	1000
5	2500	1800	1150	900
10	2100	1600	1000	750
15	1800	1400	900	700

В сети могут быть два ведущих устройства, одним из которых является контроллер, вторым – ручной коммуникатор, используемый для считывания показаний и установки параметров HART-устройств. Коммуникатор может быть подключен в любом месте сети, но обычно доступными являются только клеммы датчиков или коммутационные клеммы в монтажном шкафу.

Сеть допускает горячую замену или добавление новых устройств (т.е. без отключения питания). В случае сбоя, например при случайном коротком замыкании, сеть повторяет невыполненные операции обмена.

В HART-сети только один узел может посылать сигнал, в это время остальные "слушают" линию. Иницирует процедуру обмена ведущее устрой-



ство (контроллер или ручной коммуникатор). Ведомые устройства получают команду и посылают ответ на нее. Каждое ведомое устройство имеет персональный сетевой адрес, который включается в сообщение ведущего устройства. Адрес имеет длину 4 бита ("короткий адрес") или 38 бит ("длинный адрес"). Имеется также второй способ адресации – с помощью тегов (идентификаторов, назначаемых пользователем).

Каждая команда или ответ на нее называются сообщением и имеют длину от 10... 12 байт до 20...30 байт.

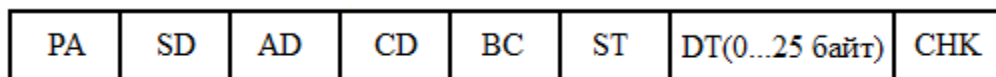


Рис. 3.43. Формат сообщений в HART-протоколе

Сообщение (рис. 3.43) начинается с преамбулы и заканчивается контрольной суммой. Элементы сообщения перечислены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Элементы сообщений HART-протокола

Обозначение	Название	Длина в байтах	Назначение
PA	Преамбула	5...20	Синхронизация и обнаружение несущей
SD	Признак старта	1	Указывает формат сообщения и источник сообщения
AD	Адрес	1 байт или 38 бит	Указывает адреса обоих устройств
CD	Команда	1	Сообщает подчиненному, что нужно сделать
BC	Количество байт в DT	1	Показывает количество байт между BC и CHK
ST	Статус	0 если ведущий, 2 если ведомый	Сообщает ошибки обмена данными, состояние устройства
DT	Данные	0...253	Аргумент, соответствующий команде CD
CHK	Контрольная сумма	1	Обнаружение ошибок

Преамбула представляет собой последовательность единиц и предназначена для синхронизации приемника с передатчиком. Длина преамбулы зависит от требований ведомого устройства. Контрольная сумма используется для обнаружения ошибок в данных. Если ошибка обнаружена, обычно выполняется повторный обмен сообщениями.

Сеть на основе HART-протокола может подключаться к другим сетям (Modbus, Profibus, Ethernet) с помощью соответствующих шлюзов. В сети также широко используются мультиплексоры, позволяющие подключить к

одному контроллеру несколько HART-сетей и одновременно играющие роль шлюза. Для подключения сети или HART-устройства к компьютеру необходим специальный HART-модем, который выпускается рядом производителей. Программный доступ SCADA к HART-устройствам выполняется с помощью HART OPC-сервера.

#### Библиографический список

1. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры. Учебное пособие/ И.А.Елизаров и др. М.: Машиностроение-1, 2004. – 180 с.
2. Шандров, Б. В. Технические средства автоматизации : учеб. для вузов по специальности "Автоматизация машиностр. процессов и пр-в (машиностроение)" направления подготовки "Автоматизир. технологии и пр-ва"/ Б. В. Шандров – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 362 с.
3. Н.Л. Прохоров и др. Управляющие вычислительные комплексы. Учеб. пособие/ 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 352 с.
4. Беляев, Г.Б. и др. Технические средства автоматизации в теплоэнергетике/ М.: Энергоатомиздат, 1987. – 303 с.
5. Родионов, В.Д. Технические средства АСУТП/ В.Д.Родионов, В.А.Терехов, В.Б.Яковлев – М.: Высш. Шк., 1989. –263 с.
6. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: справочное пособие / А.С. Ключев и др; под ред. А.С. Ключева.– Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1989. – 368 с. : ил.
7. Р.П. Строганов, Управляющие машины и их применение: Учеб. пособие. М.: Высш. Шк., 1989. – 240 с.
8. Балюбаш В.А, Добряков В.А., Назарова В.В. Средства автоматизации и управления.: Учеб.-метод. пособие. Ч.1 /СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. –72 с.
9. Шахворостов, С.А. Технические средства автоматизации: учеб. пособие/ С.А. Шахворостов. – М.: МАДИ, 2011. – 109 с.
10. Мячев, А.А. Интерфейсы систем обработки данных/ А.А. Мячев, В.Н.Степанов, В.К.Щербо – М.: Радио и связь, 1989. – 416с.; ил.

#### Электронные ресурсы

1. <http://www.zeim.ru/production/docs>.
2. <http://www.klapan.ru/production>.
3. [http://portal.tpu.ru/SHARED/w/WAW/methodical%20work/Tab/Voloshenko\\_Gorbunov.pdf](http://portal.tpu.ru/SHARED/w/WAW/methodical%20work/Tab/Voloshenko_Gorbunov.pdf).
4. [http://www.bookasutp.ru/Chapter2\\_3.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter2_3.aspx)
5. [http://www.bookasutp.ru/Chapter2\\_5.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter2_5.aspx)
6. [http://uiits.miem.edu.ru/Falk/kniga\\_TSAU/index.html](http://uiits.miem.edu.ru/Falk/kniga_TSAU/index.html)

## Содержание

Введение. . . . .	3
1. Унифицированные электрические сигналы . . . . .	5
1.1. Унифицированные сигналы напряжения. . . . .	6
1.2. Унифицированные токовые сигналы. . . . .	7
1.3. Импульсно-модулированные сигналы. . . . .	9
1.4. Дискретные двоичные сигналы . . . . .	9
1.5. Унифицированные цифровые сигналы. . . . .	9
1.6. Унифицирующие преобразователи. . . . .	10
2. Технические средства локальных систем регулирования и управления. . . . .	11
2.1. Принципы построения электронных регуляторов. . . . .	11
2.2. Принципы управления исполнительными механизмами постоянной скорости. . . . .	14
2.3. Устройство и принцип работы релейно-импульсного регулятора. . . . .	17
2.3.1 Узел суммирования и кондуктивного разделения. . . . .	19
2.3.2. Узел демпфирования. . . . .	20
2.3.3. Узел триггеров. . . . .	20
2.3.4. Узел выходных усилителей. . . . .	21
2.3.5. Узел обратной связи. . . . .	21
2.3.6. Реакция релейно-импульсного регулятора на ступенчатое входное рассогласование. . . . .	22
2.3.7. Реализация типовых законов системами регулирования на базе релейно-импульсных регуляторов. . . . .	23
3. Технические средства автоматизированных систем управления технологическими процессами. . . . .	26
3.1. Функциональная структура АСУТП. . . . .	26
3.2. Архитектура комплекса технических средств АСУТП. . . . .	29
3.3. Классификация и структура микропроцессорных программируемых контроллеров. . . . .	31
3.4. Универсальные составляющие подсистем УСО МПК. . . . .	34
3.4.1. Цифроаналоговый преобразователь. . . . .	34
3.4.2. Аналого-цифровые преобразователи. . . . .	36
3.4.2.1. Классический АЦП последовательного счета. . . . .	36
3.4.2.2. АЦП последовательного счета с компенсационным интегрированием. . . . .	37
3.4.2.3. АЦП поразрядного кодирования. . . . .	39
3.4.3. Коммутаторы информационных сигналов. . . . .	40
3.5. Структура и принципы работы подсистем УСО МПК. . . . .	43
3.5.1. Подсистема аналогового ввода. . . . .	43
3.5.2. Подсистема аналогового вывода. . . . .	45
3.5.3. Подсистема дискретного ввода . . . . .	47
3.5.4. Подсистема дискретного вывода. . . . .	48
3.6. Управление исполнительными устройствами в АСУТП. . . . .	49
3.6.1. Управление регулирующими клапанами с пневматическим приводом. . . . .	49

3.6.2. Управление отсечными клапанами с пневматическим приводом. . . . .	50
3.6.3. Управление регулирующими и отсечными клапанами с электрическим приводом. . . . .	51
3.6.4. Управление электродвигателями с помощью частотных преобразователей. . . . .	52
3.6.5. Управление электродвигателями с помощью магнитных пускателей. . . . .	54
3.7. Стандартные интерфейсы АСУТП. . . . .	55
3.7.1. Классификация стандартных интерфейсов. . . . .	55
3.7.2. Протоколы и типовые алгоритмы обмена информацией. . . . .	57
3.7.3. Протокол обмена MODBUS. . . . .	59
3.7.4. Последовательные интерфейсы RS-422 и RS-485. . . . .	64
3.7.5. Обмен информацией по HART-протоколу. . . . .	68
Библиографический список . . . . .	74

Учебное издание

**Самарский Александр Петрович**

Технические средства автоматизации  
Электронные системы

Учебное издание

Редактор О.А.Соловьева  
ФГБОУ ВО Ивановский государственный  
химико-технологический университет

155000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7